



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VYUŽITÍ AGROMATERIÁLŮ PRO VYTÁPĚNÍ RODINNÝCH
DOMŮ**

USE OF AGROMATERIALS FOR HEATING HOUSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Anna Kudová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Anna Kudová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití agromateriálů pro vytápění rodinných domů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro vytápění rodinných domů se z biomasy nejčastěji využívá kusové dřevo, dřevěné pelety nebo brikety. Existuje ale velká skupina odpadní biomasy, která je pro vytápění neméně vhodná. Jedná se především o bioodpady ze zemědělství, sadařství, chovatelství, zahrádek atp. Náplní bakalářské práce je zjistit jaké problémy se vyskytují, pokud v klasickém kotli nahradíme dřevní biomasu biomasou odpadní. Práce je spojená s laboratorním určením vlastností odpadních paliv a se spalovacími experimenty na teplovodním kotli.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše druhů biomasy a jejich vlastností,
- legislativa ochrany ovzduší ve vztahu ke kotlům na tuhá paliva,
- experimentální porovnání vlivu změny paliva na provoz kotle.

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019. ISBN 978-80-214-5769-7.

JANDAČKA, Jozef. et al. Biomasa ako zdroj energie. Žilina 2008, ISBN 978-80-969161-3-9.

NOSKIEVIČ, Pavel, Pavel KOLIČNÝ a Tadeáš OCHODEK. Malé zdroje znečišťování, VEC Ostrava 2004.

TRÁVNÍČEK, Petr. Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-206-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zaměřuje na energetické využití biomasy, a to především srovnání dřevních a senných pelet. První, rešeršní část se věnuje vlastnostem paliv, kotlům na tuhá paliva a související legislativou. Druhá část se zabývá experimentem, který porovnává spalování obou druhů pelet na automatickém teplovodním kotli. Také je proveden hrubý rozbor paliv.

Klíčová slova

Biomasa, dřevní peleta, emise, agropelety, kotle na tuhá paliva, hrubý palivový rozbor

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the biomass usage for energy generation in particular on comparison to wooden between hay pellets. First part is dedicated to fuel attributes, solid fuel boilers and pertaining legislation. Second part deals with an experiment which compares burning of both types of pellets in an automatic hot water boiler. The proximate analysis of fuels is conducted as well.

Key words

Biomass, wood pellet, emission, agro-pellets, solid fuel boilers, proximate analysis of a fuel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUDOVÁ, Anna. Využití agromateriálů pro vytápění rodinných domů. Brno, 2021.
Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132755>. Bakalářská práce.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Využití agromateriálů pro vytápění rodinných domů** vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a pramenů, které jsem uvedla v seznamu.

V Brně dne 21. 5. 2021

.....
Anna Kudová

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych ráda poděkovala panu doc. Ing. Markovi Balášovi, Ph.D. za všechny připomínky, věcné rady a předané praktické zkušenosti při tvorbě této bakalářské práce.

Obsah

1 Úvod.....	11
2 Biomasa.....	12
2. 1 Druhy biomasy	12
2. 2 Využití biomasy	14
2. 3 Zpracování biomasy	15
2. 3. 1 Přímé spalování	15
2. 3. 2 Anaerobní fermentace.....	15
2. 3. 3 Kvašení	15
2. 3. 4 Ropná těžba	15
2. 3. 5 Pyrolýza	16
2. 3. 6 Zplyňování.....	16
3 Paliva z biomasy	17
3. 1 Pelety	17
3. 2 Brikety	19
3. 3 Kusové dřevo	19
3. 4 Štěpka	19
3. 5 Vlastnosti paliv.....	20
3. 5. 1 Výhřevnost.....	21
3. 5. 2 Spalné teplo	21
3. 5. 3 Obsah vlhkosti	21
3. 5. 4 Objemová hmotnost paliv.....	22
4 Kotle na tuhá paliva	23
4. 1 Základní konstrukční části kotle	23
4. 2 Rozdělení kotlů do základních kategorií.....	24
4. 3 Hořáky pro automatické kotle	24
5 Dotčená legislativa.....	27
5. 1 ČSN EN 303-5:2012	27
5. 2 Ekodesign.....	29
5. 3 Kotlíková dotace	30
5. 4 Emise.....	30

5. 4. 1 Emisní faktory CO.....	31
5. 4. 2 Emisní faktory NO _x	31
5. 4. 3 Složky spalín O ₂ a CO ₂	32
5. 4. 3 Organický plynný uhlík OGC.....	33
5. 4. 4 TZL.....	33
6 Praktická část	34
6. 1 Popis experimentu na teplovodním kotli.....	34
6. 2 Kotel	37
6. 3 Hrubý rozbor paliva	38
6. 3. 1 Stanovení obsahu vody tuhých paliv	39
6. 3. 2 Stanovení obsahu prchlavé hořlaviny tuhých biopaliv.....	40
6. 3. 3 Stanovení obsahu popela v tuhých palivech.....	42
6. 3. 4 Stanovení spalného tepla	43
7 Výsledky experimentální části a její zhodnocení.....	45
7. 1 Výsledky experimentu prováděném na teplovodním kotli	45
7. 1. 1 Spalování dřevních pelet	45
7. 1. 2 Spalování pelet ze sena.....	47
7. 2 Výsledky hrubého rozboru paliv	49
7. 2. 1 Srovnání obsahu vody	49
7. 2. 2 Srovnání obsahu popela.....	50
7. 2. 3 Srovnání obsah prchlavé hořlaviny	52
7. 2. 4 Srovnání hodnot spalného tepla.....	52
7.3 Zhodnocení experimentu.....	53
8 Závěr	55
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	59
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	60
SEZNAM TABULEK	62
SEZNAM GRAFŮ.....	63

1 Úvod

Hlavní problematikou dnešního světa je otázka globálního oteplování, ekologie či energetického zásobování planety. V současnosti většina vyspělých států poslední roky inklinuje k snížení používání fosilních paliv a snaží se je nahradit palivy obnovitelnými, do kterých spadá i biomasa. Mimo to dochází i ke zpřísnění podmínek pro provoz kotlů na tuhá paliva, a to především omezení emisí.

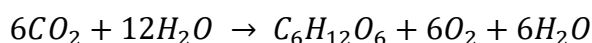
V České republice je tento rok v plánu spuštění pokračování dotačního programu známý jako kotlíková dotace, který výrazně podporuje ekologičtější přístup k vytápění rodinných domů a jiných menších objektů. Jedním z cílů této práce bude přiblížení tohoto projektu a shrnutí základních požadavků a norem na provoz kotlů vhodných do domácností.

Dalším velkým tématem této doby je zpracování odpadu, jak ze zemědělství, tak i jiných průmyslových odvětví. Ukazuje se, že některé druhy odpadu mají velký potenciál pro další využití a mohou sloužit i k výrobě tepla. Dalším úmyslem této práce bude srovnání paliv a dopad používání alternativních zdrojů na provoz kotle. Bude uskutečněn pokus, kde se porovná spalování dřevních a senných pelet na teplovodním automatickém kotli a následné zhodnocení, zda je použití odpadní biomasy pro výrobu tepla v domácnosti správné ekologické řešení.

2 Biomasa

Biomasa byla až do 18. století nejdůležitějším zdrojem energie. S příchodem využívání fosilních paliv v průmyslově vyspělých zemích byla biomasa opomíjena, přitom v současné době je využívána v některých rozvojových zemích jako elementární zdroj. Počátkem 21. století se kvůli zvýšení cen ropy biomasa vrátila do podvědomí rozvinutých zemí.

Pojem biomasa označuje hmotu z organického materiálu, kterým jsou například živé a odumřelé organismy nebo produkty látkové výměny. Na zemi jsou zdroje biomasy rozloženy nerovnoměrně, protože pro její vznik je zásadní sluneční energie a voda. Živočichové jsou schopni vytvářet biomasu jen z jiné, další biomasy, tudíž základním principem vzniku je přeměna energie slunce rostlinami. [1] Základním chemickým procesem pro její vznik je fotosyntéza, jejíž rovnice je:

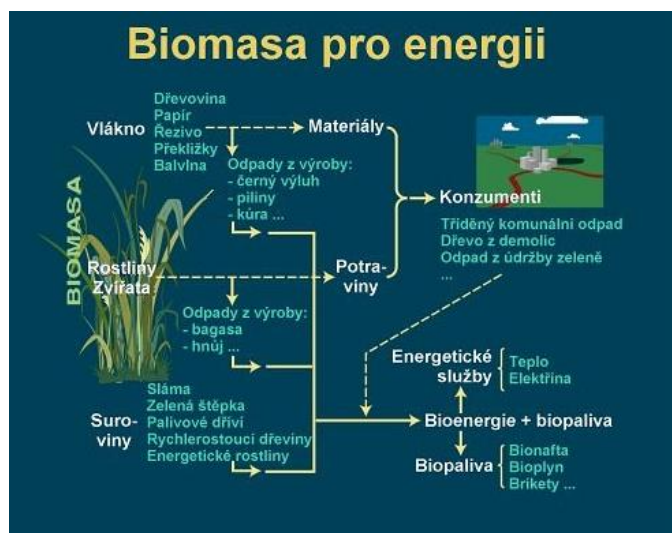


Při ní vznikají z vody a oxidu uhličitého sacharidy a zároveň se uvolňuje kyslík. Fotosyntéza je ovlivněna několika faktory, jako je např. světlo, teplota, staří rostlin. [2]

2.1 Druhy biomasy

Kategorií biomasy je hned několik. Základní rozdělení může být:

- Biomasa pěstovaná pro účely získávání energie - sem se zařazují rychle rostoucí dřeviny, obiloviny, travní porosty nebo olejnaté rostliny
- Odpadní biomasa - to mohou být odpady z živočišné (exkrementy, zbytky krmiva, ...) nebo rostlinné (sláma, zbytky z likvidace křovin) výroby, splašky nebo odpad z těžby lesa [4]



Obr. 2.1 Využití biomasy [4]

- Odpady ze zemědělství - po celém světě je produkováno velké množství rostlinných zbytků, jako jsou třeba rýžové slupky nebo klasy z kukuřic. V současnosti se využívají jako potrava pro dobytek nebo se ponechají k rozkladu v půdě. Tyto zbytky jsou vhodné i pro termochemické zpracování s účelem výroby elektřiny a tepla. Vyznačují se sezónní dostupností, ale mají vysoký obsah těkavých látek, nižší hustotu a dobu hoření.
- Živočišné odpady - existuje jich celá řada. Nejčastěji se využívá trusu zvířat a drůbeže. V minulosti se odpad používal jako hnojivo, ale s přísněním ekologických předpisů (např. znečištění vody nebo kontrol zápachu) se od tohoto způsobu opustilo. I díky tomuto důvodu se začal organický materiál používat k přeměně na energii. Nejatraktivnějším způsobem je přeměna na bioplyn, který lze použít jako palivo pro spalovací motory, k výrobě elektřiny z malých plynových turbín nebo třeba přímé spalování k ohřevu prostorů a vody.
- Zbytky z lesnictví/zpracování dřeva - odpad z lesnictví vzniká především při odlesňování. Do něj je zahrnuto i dřevo poškozené hmyzem nebo chorobami. Při zpracování dřeva (výroba nábytku, podlah, truhlářství, ...) vzniká téměř polovina hmoty jako odpad: v nábytkářském průmyslu při zpracování 1 000 kg vznikne 450 kg odpadu.
- Průmyslové odpady - jich nejvíce vyprodukuje potravinářský průmysl, ať už jde o tuhé odpady (zbytky nevhodné zeleniny a ovoce, kávová sedlina, ...) nebo kapalné (při mytí masa, čištění drůbeže a ryb nebo při výrobě vína), všechny obsahují cukry a další látky, které se dají využít k výrobě bioplynu.
- Tuhý odpad a splašky - tuhý odpad se v drtivé většině likviduje na skládkách, kde lze získat tzv. skládkový plyn (přibližně 50% metanu a 50% oxidu uhličitého) a použít ho k výrobě energie a tepla. Splašky jsou podobné ostatním živočišným odpadům a také je lze použít k výrobě bioplynu. [7]

Podle původu:

- Dřevní - která pochází ze stromů, keřů a křovin.
- Bylinná - tvořena z dřevin, které nemají dřevnatý stonek (např. obiloviny, traviny, luskoviny)
- Ovocná - z rostlin, které jsou ze semen nebo semena obsahují (bobule, dužnina)
- Směsná - kombinace dříve zmíněných skupin [3]

Podle vlastností:

- suchá - určená k přímému spalování
- vlhká - není možné ji spalovat přímo, je určená k výrobě bioplynu
- speciální - např. olejnin, slouží k získávání energetických látek - může se jednat o bionaftu nebo líh [4]

2.2 Využití biomasy

Kapitola pojednává o statistikách výroby energie z biomasy v České republice. Pro účely dané statistiky se rozumí spalování dřevní a rostlinné hmoty, jako je např.: palivové dřevo, celulóznové výluhy, kapalná biopaliva. U výroby elektřiny se od roku 2014 získávají data v rámci jednotné statistiky MPO a ERÚ, většina dat je licencována. V případě výroby tepelné energie jsou pro licencované zdroje data brána od roku 2017. [5]

Palivo	Počet respondentů	Hrubá výroba elektřiny (MWh)	Dodávka do vlastního podniku nebo zařízení vč. ztrát (MWh)	Prodej elektřiny (MWh)	Spotřeba paliva (t)
Palivové dřevo	1	146,3	23,2	123,2	174,3
Dřevní štěpka, odpad	32	1 229 830,4	279 635,0	950 195,4	1 146 021,3
Celulóznové výluhy	2	858 656,6	690 403,4	168 253,2	521 951,4
Rostlinné materiály	7	94 380,3	11 817,6	82 562,7	93 856,7
Brikety a pelety	12	214 521,1	42 656,6	171 864,5	135 538,6
Ostatní biomasa	-	-	-	-	-
Kapalná biopaliva	7	1 198,8	647,8	551,0	279,0
Celkem	49	2 398 733,6	1 025 183,7	1 373 549,9	1 897 821,4

Tab. 2.2 Výroba elektřiny z biomasy podle jejich typů v roce 2019 [5]

Palivo	Počet respondentů	Hrubá výroba tepla (GJ)	Dodávka do vlastního podniku nebo zařízení vč. ztrát (GJ)	Přímé dodávky cizím subjektům (GJ)	Spotřeba paliva (t)
Palivové dřevo	405	419 947,5	399 534,4	20 413,0	41 638,1
Dřevní štěpka, odpad	516	11 903 109,6	6 944 151,6	4 958 958,0	1 401 818,4
Celulóznové výluhy	2	10 323 296,2	9 535 483,2	787 813,0	1 217 776,3
Rostlinné materiály	78	587 924,8	203 961,0	383 963,8	59 962,2
Brikety a pelety	255	917 465,5	312 624,0	604 841,5	64 307,4
Ostatní biomasa	-	-	-	-	-
Kapalná biopaliva	6	2 416,5	2 416,5	0,0	84,3
Celkem	1 091	24 154 160,0	17 398 170,7	6 755 989,3	2 785 586,8

*) bez domácností a drobných spotřebitelů

Tab.2.3 Výroba tepelné energie z biomasy podle jejich typů v roce 2019 *) [5]

Tabulky jsou zaměřené na výrobu elektřiny a tepelné energie z biomasy mimo domácnosti. V obou případech se na tuto výrobu spotřebuje nejvíce dřevní štěpky. Celková spotřeba paliva je přibližně 4,7 milionu tuny.

2. 3 Zpracování biomasy

Zpracování biomasy se dá rozdělit na 6 základních procesů:

- Přímé spalování (zdroj elektrické energie)
- Anaerobní fermentace (získání plynu bohatého na metan)
- Kvašení (cukru na alkohol)
- Ropná těžba (bionafta)
- Pyrolýza (biouhel, plyn a olej)
- Zplyňování (získání oxidu uhelnatého a plynu bohatého na vodík)

Na tyto technologie mohou navazovat další úpravy (lisování oleje, sušení,...) v závislosti na konkrétních finálních produktech. Přeměna biomasy na energii se dá rozdělit do čtyř procesů: přímé spalování, procesy termochemické přeměny, biochemické procesy a fyzikálně-chemické procesy. [6]

2. 3. 1 Přímé spalování

Jde o nejstarší metodu získávání energie z biomasy. Je to termochemický proces, při kterém se získává hořlavý plyn a další látky z organického materiálu. Následně dochází za přítomnosti vzduchu k oxidaci, při které se uvolňuje oxid uhličitý, voda a teplo. Narozdíl od použití fosilních paliv se biomasa při spalování vyznačuje nulovou bilancí oxidu uhličitého. [4]

2. 3. 2 Anaerobní fermentace

Jedná se o technologii, při které se mění organická hmota na biologicky stabilizovaný substrát a bioplyn. Je používána nejvíce u zbytkové biomasy, která pochází z potravinářského, zemědělského nebo dřevařského průmyslu. [11]

2. 3. 3 Kvašení

V bioplynových stanicích se získává bioplyn kvašením odpadů ze zemědělského (např. kukuřičné klasy) nebo živočišného (hnůj, kejda) průmyslu. Ten zde potom slouží k výrobě tepla. Bioplyn je bohatý na metan, který se poté spaluje v kotlích. [12]

2. 3. 4 Ropná těžba

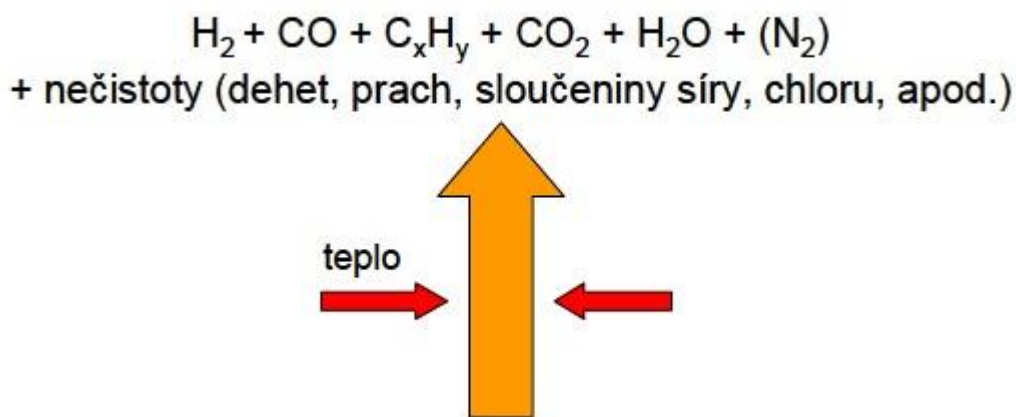
Biopaliva skýtají spoustu nevýhod - v extrémních případech se na výrobu jednoho litru spotřebuje více než litr konvenčních fosilních paliv. I přes to mohou mít budoucnost, a to v podobě těžby mikroskopických řas, bakterií a hub. Palivo z řas je možný vyrábět už v současnosti, ale jeho nevýhodou je mnohonásobně vyšší cena, než je cena konkurenčních fosilních paliv. [13]

2. 3. 5 Pyrolýza

Při pyrolýze probíhá proces, kdy se tepelně zpracovává materiál bez přístupu ke kyslíku, vzduchu či jiných zplyňovacích látek. Po dosažení rozkladové teploty dochází ke snížení stability vysokomolekulárních látek, ty se štěpí a dojde k uvolnění nízkomolekulárních látek. Poté vznikají čtyři hlavní produkty: pyrolýzní plyn, olej, voda a tuhý zbytek. První dva zmíněné lze používat jako palivo. [14]

2. 3. 6 Zplyňování

Zplyňování je termochemická přeměna materiálu na bázi uhlíku v pevném nebo kapalném skupenství na energetický plyn (H_2 , CO , CH_4 a další sloučeniny) viz. Obr 2.4.

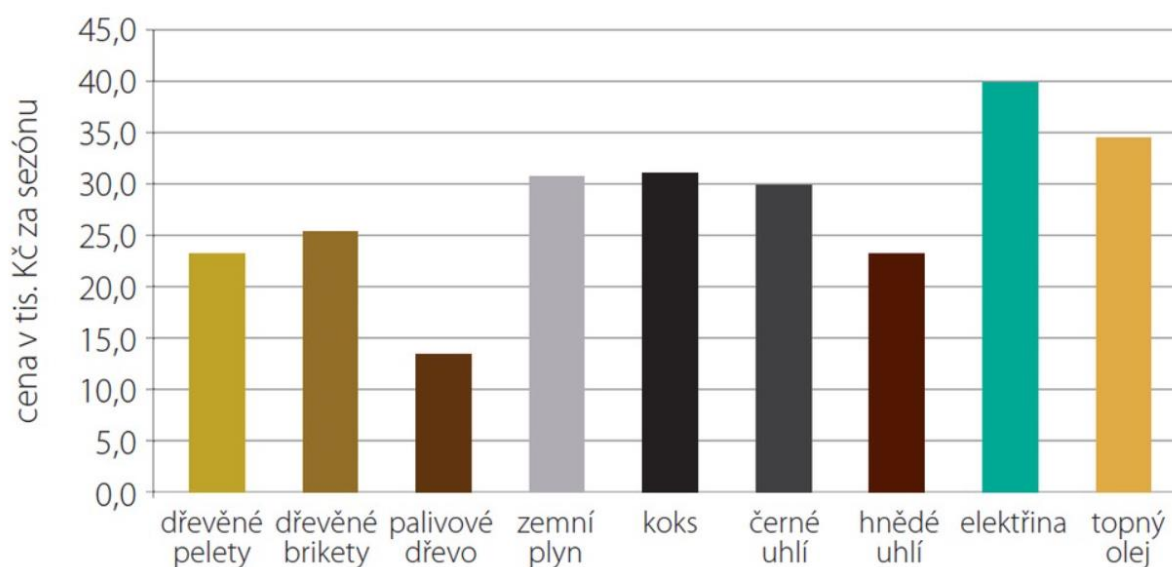


Obr. 2.4 Princip zplyňování [15]

Je to komplexní proces, u kterého se jedná o 4 základní pochody: sušení, pyrolýza, redukce a oxidace. Ty probíhají buď postupně, nebo souběžně (např. ve fluidních generátorech). [15]

3 Paliva z biomasy

Biomasa je jeden z tzv. obnovitelných zdrojů – jejich využíváním není tolik zatížená příroda a jsou téměř neomezené. Další výhodou je ekonomická úspora při výrobě tepla z biomasy. Na Obr. 3.1 lze vidět, že topení palivovým dřevem je z ekonomického hlediska nejvýhodnější. Údaje jsou za rok 2012. Dále následují dřevěné pelety a brikety. Nejméně výhodné je topení elektřinou nebo topným olejem. [16]



Obr. 3.1 Náklady na vytápění [16]

3. 1 Pelety

Pelety jsou ekologicky ušlechtilé palivo, které se vyrábí především z dřevní biomasy. Mají podobu slisovaných granulí kruhového průřezu (viz Obr. 3.2) a jsou spalovány v automatických peletových kotlích nebo kamnech. Jejich výhodou je skladnost, snadná manipulace a především bezobslužnost při spalování. [16]

Jejich obvyklá velikost je v průměru 6 mm, délka se pohybuje mezi 5 – 40 mm. Mohou mít různé barvy, záleží na použitém druhu paliva, kvalitě suroviny, vlhkosti, příměsí atp. Platí, že čím světlejší dřevní peleta, tím méně příměsí kůry obsahuje – je tudíž kvalitnější. Dřevní pelety se vyznačují nízkou vlhkostí (okolo 8%) a nízkým obsahem popele (1%).

Dají se používat na velkém množství kotlů a kamen, od rodinných domů až po velké budovy. Jejich kvalita se posuzuje podle několika norem – na trhu převládají německé normy DIN a DIN plus. Obvykle se výhřevnost pohybuje mezi 16 až 18 MJ/kg, objemová hmotnost okolo 850 kg/m³.

Pelety jsou vyráběny silným stlačením dřevěných nebo zemědělských zbytků. Tento proces se nazývá peletování. Velkou roli pro jejich soudržnost má kromě vysokého tlaku i obsah ligninu ve dřevě.

Pokud dojde k dokonalému spalování, nevznikají žádné škodliviny a vzniká pouze oxid uhličitý, vodní pára a nepatrné množství popele (asi 0,5 % spáleného paliva). [23]



Obr. 3.2 Dřevní pelety [16]

Dále existují nedřevní pelety:

- Rostlinné pelety: složení rostlin, ze kterých je rostlinná peleta vyrobena, je značně závislé na klimatických podmínkách či půdě - proto i tyto pelety mají různé vlastnosti. Oproti peletám dřevěným mají mnohonásobně vyšší podíl popelovin. I proto jsou tyto pelety spalovány především ve velkých zdrojích, kde je celý spalovací proces pod kontrolou a dochází k několikasupňovému čištění.
- Papírové pelety: Využívání těchto pelet lze pozorovat především u právnických osob, kteří využívají odpady z vlastního průmyslu (např. tiskárny, papírny,...). Nevýhodou je velké množství popelovin a přítomnost lepidla a tiskařské barvy.



Obr.3.3 Srovnání odpadu u papírových pelet [3]

- Směsné pelety: Jak už název vypovídá, směsné pelety se skládají z kombinace různých spalitelných materiálů (např. sláma, plevy, piliny, ...). V České republice má budoucnost výroba směsi uhelného prachu a rostlinné hmoty. U malých teplovodních kotlů má tato kombinace pozitivní dopad na samotný spalovací proces.

- Černé pelety: Tyto pelety vznikají za nízkých teplot (200-300 °C) bez přístupu vzduchu pražením jinak těžce spalitelné rostlinné biomasy. Vyznačují se vyšší výhřevností a malým podílem prchavé hořlaviny. [3]

3. 2 Brikety

Brikety jsou ušlechtilé palivo, které se vyrábí z dřevní nebo rostlinné biomasy. Mají podobu plných válců nebo válců s otvory (viz. Obr. 3.4). Vyznačují se nízkou vlhkostí a vysokou výhřevností. Dají se používat jako doplňkový zdroj tepla (např. v krbových kamnech) a je možné je kombinovat s kusovým dřevem. [16]



Obr. 3.4 Dřevěné brikety [16]

3. 3 Kusové dřevo

Kusové dřevo je organický materiál, je snadno dostupný a patří mezi nejlevnější paliva k vytápění. Jeho nevýhodou je jeho vlhkost, která má velký dopad na jeho výhřevnost - pohybuje se při vlhkosti 20 % okolo 15 MJ/kg. Taktéž jeho tvrdost může ovlivňovat délku žáru v kotli. [16]

3. 4 Štěpka

Štěpka jsou drcené dřevní zbytky, používá se jako průmyslové palivo. Velkou roli hraje obsah vody, který následně určuje její výhřevnost. Tzv. tříděnou štěpku lze používat i v menších zdrojích tepla (např. automatické kotle na štěpku, které začínají od výkonu 50 kW), ale nízkojakostní štěpka není pro domácí vytápění doporučeno. [16] Její velikost se pohybuje v délkách od 3 do 250mm. Je to velmi levné biopalivo, které se používá především pro komerční účely. Na trhu se nachází druhů štěpky hned několik, nejběžnějšími jsou:

- Zelená (lesní) štěpka – získává se ze zbytků po lesní těžbě, obsahuje tedy jehličí, drobné větve nebo listí. Vyznačuje se vysokou vlhkostí
- Hnědá štěpka – je vyráběna z pilařských odřezů nebo třeba zbytkových částí kmenů.

- Bílá štěpka – obvykle se získává ze zbytků při pilařské výrobě a využívá se především pro výrobu dřevotřískových desek. [24]



Obr. 3.5 Dřevní štěpka vyrobená nožovým štěpkovačem [24]



Obr. 3.6 Dřevní štěpka vyrobená kladivovým drtičem [24]

3. 5 Vlastnosti paliv

Biomasa jako palivo se dá porovnávat podle stejných fyzikálních a chemických kritérií jako konvenční tuhá paliva. Do těchto kritérií se zahrnuje: “výhřevnost, spalné teplo, měrná hmotnost, údaje z hrubého rozboru (zjišťuje se výhřevnost a hmotnostní obsah vody, popela a prchavého podílu v %), údaje z prvkového rozboru (zjišťuje se hmotnostní obsah prvků jako je např. vodík, uhlík, síra, dusík, chlor nebo fluor) a údaje o vlastnostech popelovin (teploty spékání, měknutí, tání a tečení)”.

Jednou z nejdůležitějších vlastností je proměnný a často vysoký obsah vody. Ten negativně ovlivňuje proces spalování. [17]

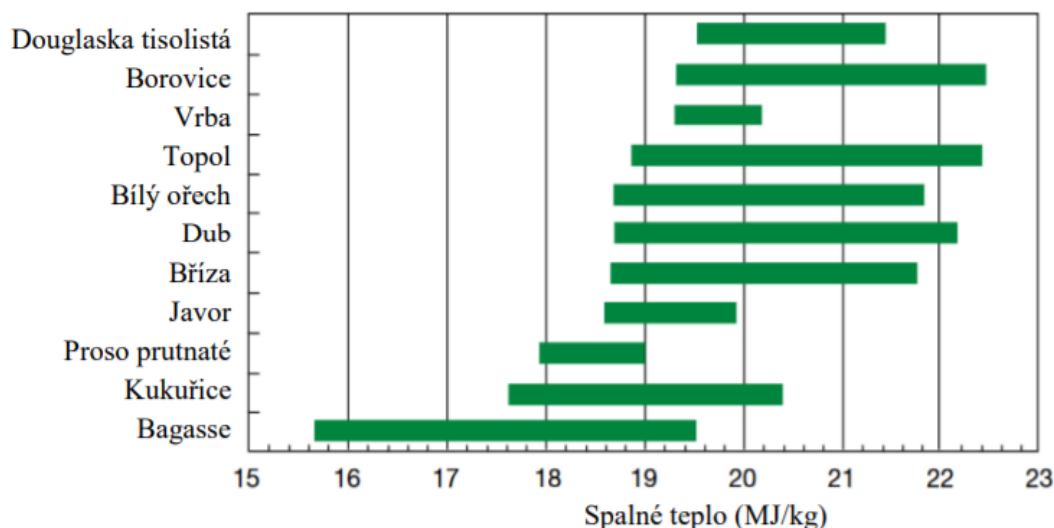
3. 5. 1 Výhřevnost

Výhřevnost se definuje jako energie, která se dá získat spálením jednotkového množství zkoumaného paliva - obvykle 1 kg. Při tomto spalování se tvoří spaliny obsahující vodu ve formě páry, čímž se výhřevnost rozlišuje od spalného tepla. Její jednotka je MJ/kg.

3. 5. 2 Spalné teplo

Spalné teplo je definováno jako energie získána dokonalým spálením jednotkového množství paliva za vzniku oxidu uhličitého, dalších plyných spalin a vody v kapalném skupenství. Díky tomu dosahuje vysokých hodnot u paliv s vyšším obsahem vodíku, jako je třeba zemní plyn. [18]

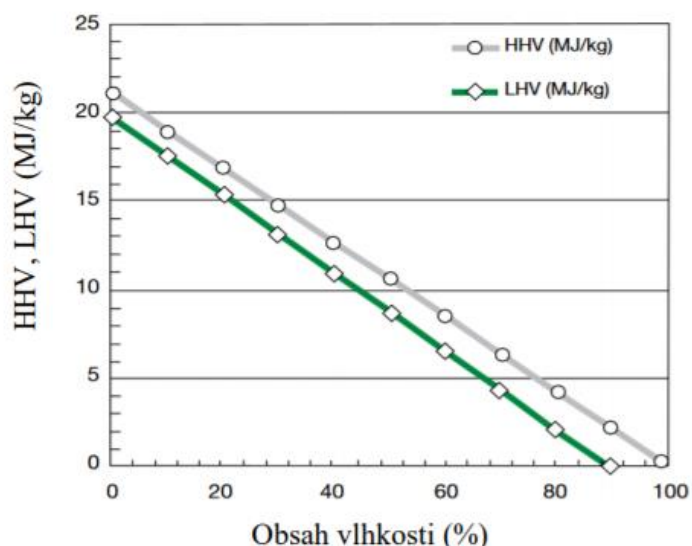
Některé druhy biomasy mají tendenci mít více energie na jednotku hmotnosti než jiné. Spalné teplo se může výrazně lišit v závislosti na klimatu a půdě, kde je daná rostlina pěstována. Obr. 3.7 ukazuje hodnoty spalného tepla u některých běžných paliv. Lze vidět, že dřevo (které má po spálení nižší obsah popela) má tendenci dosahovat o něco vyšších hodnot než polní plodiny. [22]



Obr.3.7 Spalné teplo různých paliv [22]

3. 5. 3 Obsah vlhkosti

Z hlediska výhřevnosti a spalného tepla paliva je důležité pohlížet i na obsah jeho vlhkosti. Např. čerstvé, nijak nezpracované dřevo, je často až z poloviny tvořeno vodou. Pro výrobu tepla je výhodnější nízká hladina vlhkosti, protože paliva s vysokou vlhkostí poskytují méně užitečného tepla na jednotku hmotnosti (velká část energie se spotřebuje na odpařování vody). Na druhou stranu extrémně suché palivo může způsobit problémy, jako je třeba znečištění spalovacího zařízení.[22]



Obr. 3.8 Závislost spalného tepla a výhřevnosti na obsahu vlhkosti paliva [22]

3. 5. 4 Objemová hmotnost paliv

Velikost a hustota paliva je jedním z důležitých parametrů, které ovlivňují jeho hoření. Palivo nesprávné velikosti může být negativní dopad na účinnost spalovacího procesu nebo může způsobit poškození spalovacího zařízení. V komerčním měřítku je běžnější palivo menších velikostí, protože se snáze používá v systémech automatického podávání a také umožňuje jemnější řízení rychlosti hoření. [22]

Palivo	Délka (m)	Objemová hmotnost (kg/m ³)
Piliny	0.0003-0.002	300
Sláma	0.005-0.025	60
Dřevěná štěpka	0.025-0.075	500
Dřevní pelety	0.006-0.008	600
Brikety z biomasy	0.025-0.010	600
Dřevo	0.3-0.5	400

Tab. 3.9 Velikost a objemová hmotnost typicky používaných paliv [22]

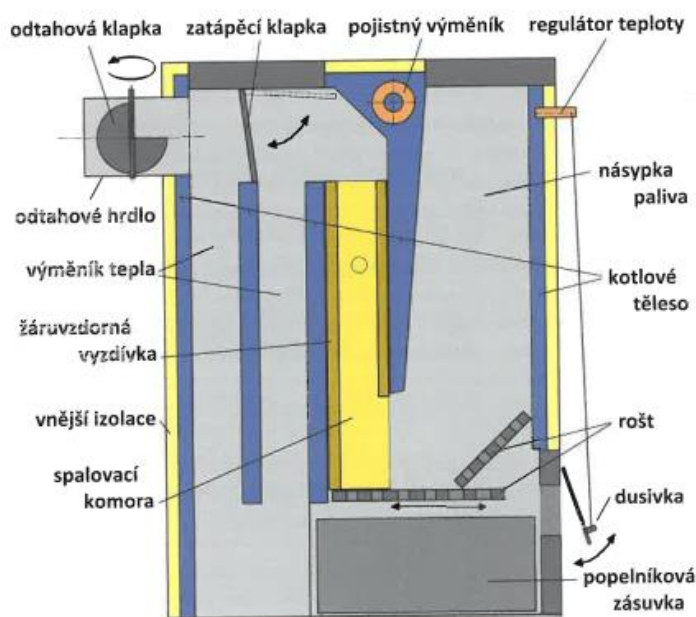
4 Kotle na tuhá paliva

Následující kapitola se bude věnovat kotlům – představení jejich základních konstrukčních částí, příklady rozdělení do kategorií a typům hořáků pro automatické kotle.

Kotel se dá definovat jako zařízení, které ohřívá teplotonosnou látku tepelnou energií, která se získává spalováním paliva. Co se týče spalování biomasy, nejčastějším případem teplotonosné látky je voda nebo vodní roztok nemrznoucí kapaliny. [8]

4.1 Základní konstrukční části kotle

Následující podkapitola pojednává o základních konstrukčních prvcích obecného teplovodního kotle.



Obr. 4.1 Obecný teplovodní kotel [8]

Kotlové těleso je základní část kotle, ve které dochází k ohřevu teplotonosné látky. **Násypka paliva** (také palivová šachta nebo příkládací prostor) je prostor, do kterého se vkládá paliva určené pro několikahodinový provoz kotle. Kotle mohou mít i zabudovaný zásobník paliva, který se nachází mimo kotlové těleso – množství paliva slouží na několikadenní provoz. Na **roštu** probíhá primární hoření základní vrstvy paliva, pod něj je nutné přivádět primární spalovací vzduch. Nad ním je spalovací prostor, ve kterém dochází jak k primárnímu hoření pevné hořlaviny, tak i k sekundárnímu vyhořívání prchlavé hořlaviny. Do této části je přiváděn sekundární spalovací vzduch. **Spalovací komora** vymezuje spalovací prostor stěnami kotlového tělesa.

Ve vnitřních prostorách kotle se nachází spalinové cesty, kde je teplota tak nízká, že je ukončeno spalování a dochází pouze k přenosu tepla z horkých spalin do otopné vody (přes teplosměnnou plochu). O vymezení spalinové cesty se stará konstrukční část, která se nazývá

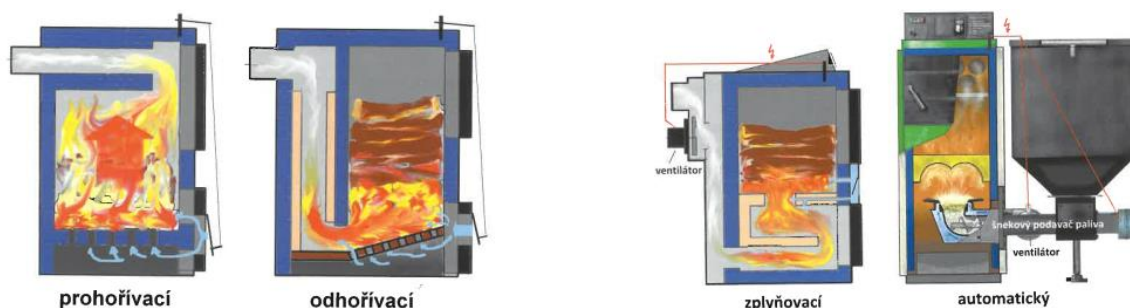
výměník tepla. Zde chlazené spaliny odcházejí **odtahovým hrdlem** do komína. Průřez hrdla je možno, např. v případě velkého komínového tahu, měnit **odtahovou klapkou**.

Důležitým prvkem kotle je **žáruvzdorná vyzdívka**, která je vyrobena z materiálů s vysokými akumulacími schopnostmi. U moderních konstrukcí se využívá různotvarých dílů, které slouží k regulaci plamene. [8]

4. 2 Rozdělení kotlů do základních kategorií

Rozdělení jde udělat hned několika způsoby:

- Podle technologie spalování na prohořivací (plyny a spaliny prochází napříč vrstvou paliva), odhořivací (palivo odhořívá na roštu a spaliny s plyny jsou odváděny do výměníku tepla), zplyňovací (vyšší úroveň spalování je docílena řízeným přísunem spalovacího vzduchu ventilátorem) a nebo automatický kotel (disponují ventilátorem řízeným přísunem spalovacího vzduchu a samočinnou dodávkou paliva)
- Podle způsobu přikládání paliva na kotle s ruční dodávkou paliva nebo se samočinnou dodávkou paliva
- Podle napojení na komínový průduch na kotle o provozu s přirozeným tahem komína, pokud vyžadují ventilátor, tak na kotle se systémem s nuceným tahem
- Podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny: ocelové nebo litinové
- Podle bezpečnosti provozu otopné soustavy na kotle pro rychle odpojitelnou, částečně odpojitelnou nebo neodpojitelnou otopnou soustavu [8] [9]



Obr. 4.2 Rozdělení kotlů podle technologie spalování [8]

4. 3 Hořáky pro automatické kotle

V následující podkapitole jsou představeny na trhu nejčastěji objevované typy hořáků.

Hořák žlabový univerzální je typ hořáku, který nejlépe spaluje dřevní, ale i rostlinné pelety větších rozměrů. Tvoří ho spalovací rošt z litiny a vzduchová směšovací komora umístěná

pod roštem a šnekový podavač, který materiál tlačí před sebe na rošt. Při spalování dochází k samočištění, protože popel přepadává otevřenou stranou do popelníku.



Obr. 4.3 Hořák samočistící [10]

Retortový hořák je ideální pro spalování kvalitních dřevních pelet nebo uhlí. Šnek je uložen na jedné straně u převodovky a materiál tlačí do pece ve tvaru kolene. Při spalování více spékavých materiálů nedochází k vytlačení a dochází často k vyhasnutí. Řešením může být otočná retorta. Výhodou tohoto hořáku je účinné spalování díky přístupu vzduchu ze všech stran do středu.



Obr. 4.4 Retortový hořák [10]

Univerzální čtvercový hořák spaluje veškeré materiály neohledě na spékavost díky šneku, který je uložen po celé délce podavače a tím tlačí materiál daným směrem nahoru – spečence jsou vytlačeny přes okraj popelníku. Hořák má vysokou spalovací teplotu díky foukání vzduchu ze čtyř stran směrem do středu.



Obr. 4.5 Univerzální hořák [10]

Součástí hořáků je vždy šnek a podavač. Ty můžou být buď litinové, nebo kovové. U volby litiny je velkou nevýhodou nepřítomnost tzv. zálevového systému, který brání zpětnému prohoření materiálu do zásobníku. Díky křehkosti litiny může také dojít k prasknutí některé z částí při výskytu nežádoucího předmětu (např. kamene nebo kovu v palivu). Naopak u kovového šneku je výhodou jeho hmotnost, menší námaha na převodovku a snadná výměna některé z částí. [10]



Obr. 4.6 Typy podavačů [10]

5 Dotčená legislativa

Při spalování tuhých paliv v kotlích dochází k emitování různých znečišťujících látek.

Jednotlivé země EU přijímají různé zpřísnující požadavky, které musí tyto změně splňovat – jsou kladeny požadavky jak na výrobce, tak i provozovatele spalovacích zařízení.

Na většině území České republiky se se začátkem topné sezóny zhoršuje kvalita ovzduší. Ze studie MŽP [26] vyplývá, že nemalý vliv mají spalovací zařízení na tuhá paliva. V ČR pro rok 2017 platila povinnost provozovatelů kotlů na tuhá paliva o jmenovitém příkonu 10-300 kW provádět revizi kotle jednou za dva roky.

5.1 ČSN EN 303-5:2012

V současné době platí pro teplovodní kotle na tuhá paliva norma 303-5 (Kotle pro ústřední vytápění - Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW). V této normě lze najít způsoby, kterými se kotle zkouší, požadavky na bezpečnost a konstrukční materiály nebo základní emisní limity.

Dle výsledků spalovacích zkoušek je zkoušenému kotli na zkušebně přiřazena třída (dle emisního limitu dané třídy). Některé státy však vyžadují pravidelné prokazování splnění limitu i u konkrétního provozovatele – skutečné emise za provozu jsou ovlivňovány kvalitou paliva, obsluhou, instalací i údržbou. Příklad emisních limitů lze vidět v tabulkách 5.1, 5.2 a 5.3. [25]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)		
			CO		
			mg/m ³ _N při 10% O ₂ (mg/m ³ _N při 13% O ₂)		
			Třída 3	Třída 4	Třída 5
Ruční	Biologické	≤ 50	5 000 (3 636)	1 200 (873)	700 (509)
		> 50 až 150	2 500 (1 818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		
	Fosilní	≤ 50	5 000 (3 636)		
		> 50 až 150	2 500 (1 818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	3 000 (2 182)	1 000 (727)	500 (364)
		> 50 až 150	2 500 (1 818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		
	Fosilní	≤ 50	3 000 (2 182)		
		> 50 až 150	2 500 (1 818)		
		> 150 až 500	1 200 (873)		

Tab.5.1 Emisní limity CO dle EN 303-5:2012 [27]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)		
			OGC		
			mg/m ³ _N při 10% O ₂ (mg/m ³ _N při 13% O ₂)		
			Třída 3	Třída 4	Třída 5
Ruční	Biologické	≤ 50	150 (109)	50 (36)	30 (22)
		> 50 až 150	100 (73)		
		> 150 až 500	100 (73)		
	Fosilní	≤ 50	150 (109)		
		> 50 až 150	100 (73)		
		> 150 až 500	100 (73)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	100 (73)	30 (22)	20 (15)
		> 50 až 150	80 (58)		
		> 150 až 500	80 (58)		
	Fosilní	≤ 50	100 (73)		
		> 50 až 150	80 (58)		
		> 150 až 500	80 (58)		

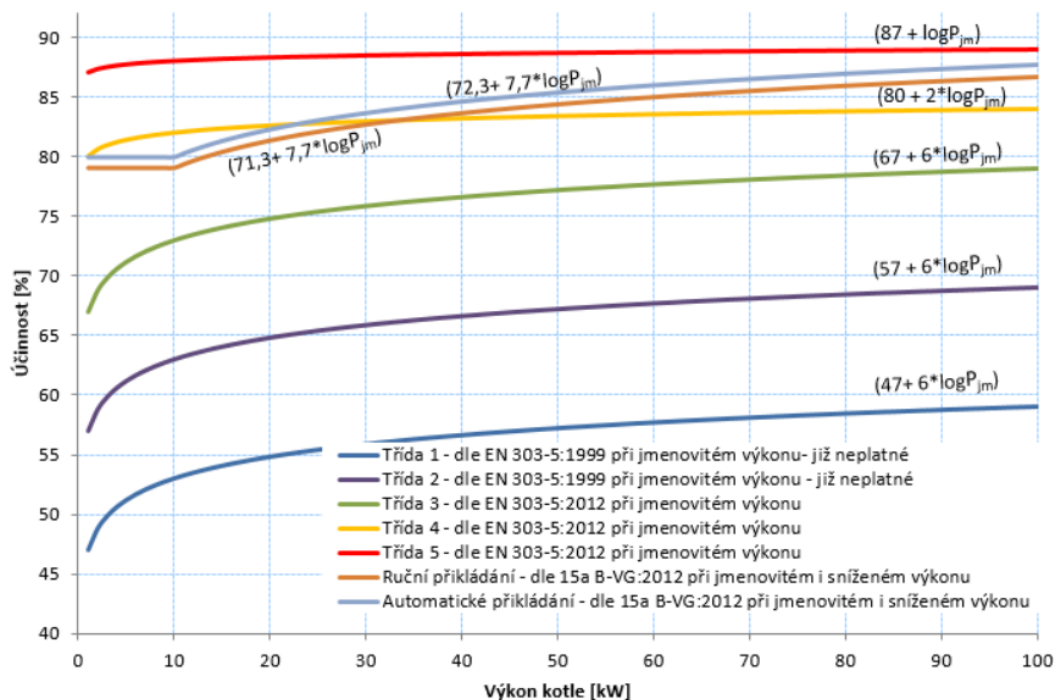
Tab.5.2 Emisní limity OGC dle EN 303-5:2012 [27]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)		
			Prach		
			mg/m ³ _N při 10% O ₂ (mg/m ³ _N při 13% O ₂)		
			Třída 3 ¹⁾	Třída 4	Třída 5
Ruční	Biologické	≤ 50	150 (109)	75 (55)	60 (44)
		> 50 až 150	150 (109)		
		> 150 až 500	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	125 (91)		
		> 50 až 150	125 (91)		
		> 150 až 500	125 (91)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	150 (109)	60 (44)	40 (29)
		> 50 až 150	150 (109)		
		> 150 až 500	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	125 (91)		
		> 50 až 150	125 (91)		
		> 150 až 500	125 (91)		

¹⁾ U kotlů emisní třídy 3 pro alternativní biopaliva není třeba splnit požadavek na emise prachu. Skutečná hodnota musí být uvedena v technické dokumentaci a nesmí překročit 200 mg/m³_N při 10% O₂ (145 mg/m³_N při 13% O₂).

Tab.5.3 Emisní limity prachu dle EN 303-5:2012 [27]

Dále je normou definována také minimální účinnost v závislosti na jmenovitém výkonu a třídě kotle (viz. Graf 5.4). Pro zplyňovací a automatické kotle není splnění účinností větší než 75 % problémem. Splnění požadavků na tuto účinnost je zkoumáno jen při zkoušce kotle, při reálné instalaci není prokazování požadováno.[25]



Graf 5.4 Minimální požadované účinnosti kotlů do 100 kW, porovnání požadavků EN 303-5:2012 [25]

5. 2 Ekodesign

Od 1. 1. 2020 musí kotle na tuhá paliva splňovat všechny požadavky, které jsou uvedené v příloze II Nařízení Komise (EU) č. 2015/1189, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva. Požadavky musí být splněny jak pro referenční palivo, tak i pro jakékoliv jiné palivo, které je vhodné pro kotle na tuhá paliva. [25]

Příklad některých požadavků:

- „sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostorů u kotlů se jmenovitým tepelným výkonem 20 kW nebo menším nesmí být menší než 75 %. Ta je definována dle vzorce:

$$\eta_s = \eta_{son} - F(1) - F(2) - F(3)$$

η_s ... sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostorů [%]

η_{son} ... sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostorů v aktivním režimu [%]

$F(1)$... ztráta sezónní energetické účinnosti, = 3%

$F(2)$... záporný příspěvek k sezónní energetické účinnosti vytápění vnitřních prostorů ze spotřeby pomocné elektrické energie, vyjádřeno jako procentní podíl

$F(3)$... kladný příspěvek k sezónní energetické účinnosti vytápění vnitřních prostorů z elektrické účinnosti kogeneračních kotlů na tuhá paliva, v procentech, počítá se:

$$F(3) = 2,5 \times \eta_{el,n} \quad (5.2)$$

- sezónní emise organických plynných sloučenin (OGC) z vytápění vnitřních prostorů nesmí být vyšší než 20 mg/m³ u kotlů s automatickým přikládáním a vyšší než 30 mg/m³ u kotlů s ručním přikládáním (při 10 % O₂)
- sezónní emise oxidů dusíku (NO_x) z vytápění vnitřních prostorů vyjádřené ekvivalentem oxidu dusičitého (NO₂) nesmí být vyšší než 200 mg/m³ u kotlů na biomasu a vyšší než 350 mg/m³ u kotlů na fosilní paliva (při 10 % O₂)
- sezónní emise částic (prach – TZL) z vytápění vnitřních prostorů nesmí být vyšší než 40 mg/m³ u kotlů s automatickým přikládáním a vyšší než 60 mg/m³ u kotlů s ručním přikládáním (při 10 % O₂)“ [28]

5.3 Kotlíková dotace

Cílem kotlíkové dotace bylo snížení znečištění ovzduší z malých spalovacích zdrojů na tuhá paliva. Byla dotována výměna lokálních topenišť do tepelného výkonu 50 kW. Celou administraci centrálně zajišťoval SFŽP a konkrétní kraj, kde výměna probíhala. O dotaci si mohla požádat každá fyzická osoba vlastníci (nebo spoluvlastníci) nemovitost určenou k bydlení. Poskytovala se jednorázovou finanční podporou. Podporovaný kotel musel splňovat minimálně 3. emisní třídu dle ČSN EN 303-5. [29]

Číslo opatření	Typ kotle	Výše dotace [Kč]
A	kotel na tuhá paliva emisní třídy 3 s automatickým dávkováním paliva	40 000
B	kotel na tuhá paliva emisní třídy 4 nebo vyšší s automatickým dávkováním paliva	60 000
C	zplynovací kotel na tuhá paliva emisní třídy 4 nebo vyšší s akumulací nádobou	55 000
D	plynový atmosférický kotel na zemní plyn	15 000
E	plynový kondenzační kotel na zemní plyn	20 000

Obr. 5.5 Podporované typy kotlů v Kotlíkové dotaci [29]

Tyto dotace byly součástí programu OPŽP 2014-2020, který umožňoval čerpat finanční prostředky z Evropského fondu pro regionální rozvoj a Fondu soudržnosti na projekty v oblasti ochrany životního prostředí. V roce 2021 ho má nahradit další, nástupnický program OPŽP 2021–2027. Schválení tohoto programu je naplánováno druhé pololetí roku 2021. Velikost dotace by měla být mezi 6 až 10 mld. Kč. [30]

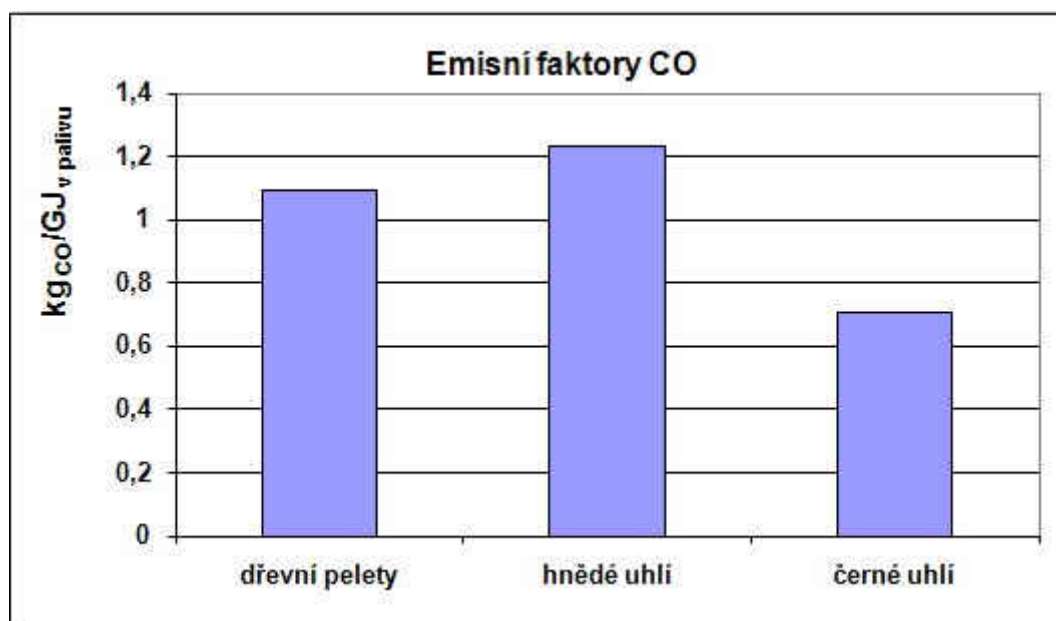
5.4 Emise

Spalování biomasy se z hlediska emisí oxidu uhličitého může pochlubit neutrální bilancí - jeho vyprodukované a spotřebované množství je stejné. Avšak při procesu spalování vznikají

jiné škodliviny, jako jsou např. polyaromatické uhlovodíky nebo dioxiny. Měřením se dokázalo, že na množství škodlivých emisí záleží na způsobu spalování. [19]

5. 4. 1 Emisní faktory CO

Kvalitu spalovacího procesu nejlépe ukazuje koncentrace oxidu uhelnatého. Jeho nedohořelý zbytek je ukazatelem špatně nastavených spalovacích parametrů nebo na nevhodnou konstrukci zařízení. [19] Oxidu uhelnatý je jedovatý plyn a patří mezi znečišťující látky, tudíž se jeho emise přísně limitují. U peletových kotlů je jeho koncentrace hlavním kritériem při stanovení ztráty plynným nedopalem. [21]

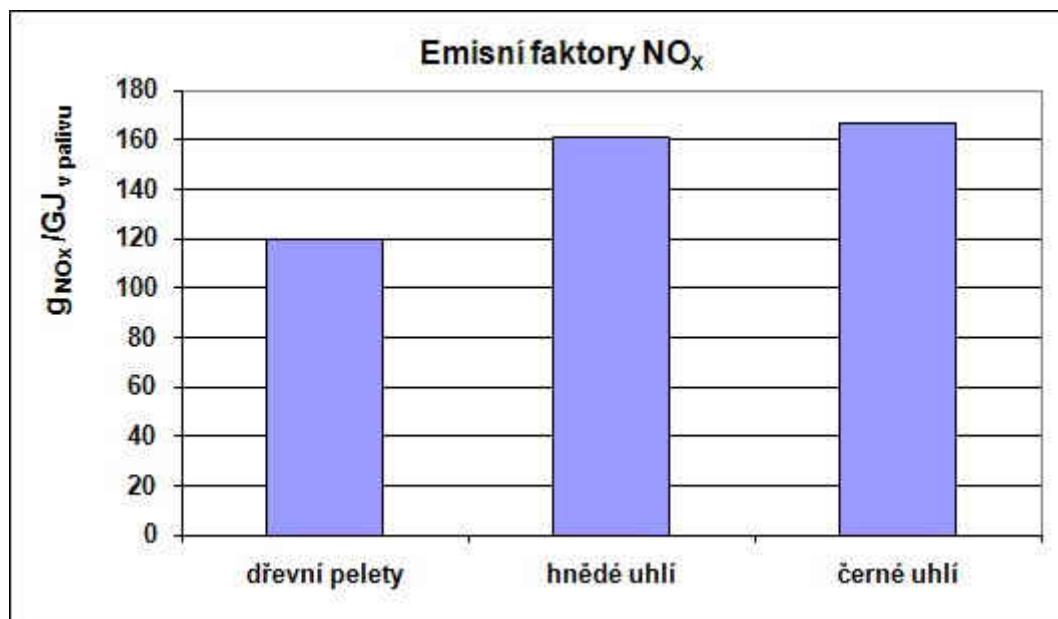


Graf 5.6 Emisní faktory CO přepočtených na výhřevnost tepla [19]

Z Grafu 5. 6 lze vyčíst, že s produkcí CO v kotli malého výkonu je na tom nejlépe černé uhlí. To se může ovšem s jinou technologií lišit.

5. 4. 2 Emisní faktory NO_x

Tyto emise jsou ovlivněny jak teplotou ve spalovací komoře, tak obsahem dusíku v palivu. S rostoucí teplotou roste i případný vznik tzv. termických sloučenin NO_x. Avšak hlavní podíl má obsah dusíku v palivu. To je problémem při spalování rostlinných pelet, které mají vysoký obsah dusíku samy o sobě. Díky horší stabilitě hoření poté vzniká velké množství palivových oxidů dusíku.

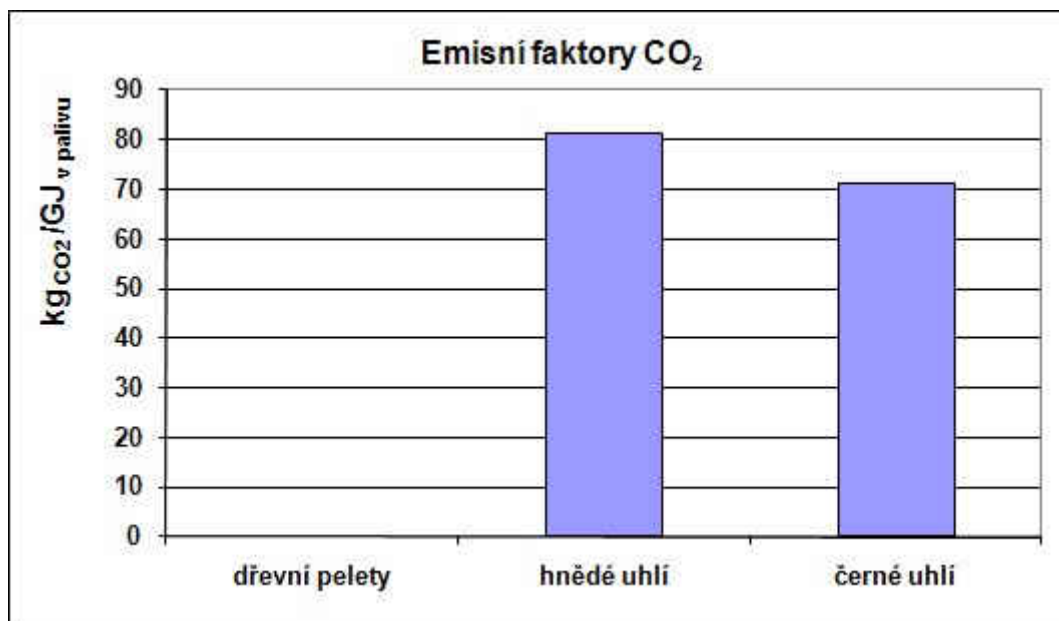


Graf 5. 7 Emisní faktory NO_x přepočtených na výhřevnost paliva [19]

Z Grafu 5.7 vyplývá, že nejmenší množství spalin vzniklo při spalování dřevních pelet a nejvíce u černého uhlí. To souvisí s vyššími teplotami při spalování právě černého uhlí. [19] [21]

5. 4. 3 Složky spalin O_2 a CO_2

Velikost objemu spalin O_2 a CO_2 spolu úzce souvisí – toho využívají analyzátory spalin. Obsah kyslíku spalovacího vzduchu je 21 %, pokud by tedy došlo k dokonalému spálení veškerého uhlíku v hořlavině, obsah oxidu uhličitého by byl také 21 %. Avšak část uhlíku spotřebují na oxidaci spalitelné složky paliva, proto je koncentrace CO_2 o něco nižší – závisí na prvkovém složení spalovaného paliva. Se snižujícím se podílem CO_2 roste podíl O_2 , to souvisí s přebytkem spalovacího vzduchu a také se jedná o nevyužitý kyslík v důsledku nedokonalosti spalování.



Graf 5. 8 Emisní faktory CO₂ [19]

V Grafu 5. 8 lze vyčíst, že emisní faktor CO₂ při spalování dřevních pelet můžeme považovat za nulový. [19] [21]

5. 4. 3 Organický plynný uhlík OGC

Při spalování se na tvorbě řady organických uhlovodíkových sloučenin, které tvoří tzv. organické složky spalin, podílí i část nespáleného uhlíku. Tento uhlík se zůstává po nedokonalém spálení CO, proto platí, že čím nižší je jeho podíl ve spalinách, tím méně je množství vznikajících OGC. Jejich vznik je dán i teplotou a přítomností různých činidel v palivu. Především u rostlinné biomasy s vyšším podílem palivového chloru je možný vznik tzv. dioxinů, které jsou karcinogenní. [21]

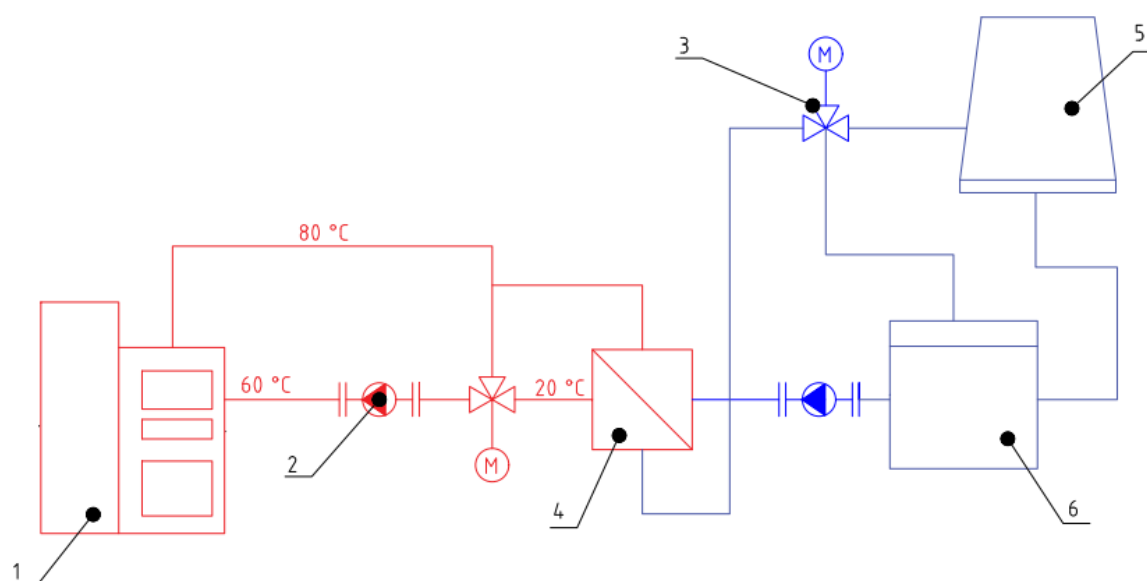
5. 4. 4 TZL

TZL – neboli tuhé znečišťující látky je název pro částice, které se dostávají z ohniště do ovzduší. Jsou to např. saze, které se vysráží ve spalinách po prudkém ochlazení plamene jako důsledek nedokonalého spálení uhlíku, nebo jemné částice popela ztržené z roštu primárním spalovacím vzduchem. TZL jsou zjišťovány v hmotnostních koncentracích a obvykle se pohybují na nízkých hodnotách, okolo 50 mg/m³. [21]

6 Praktická část

Následující část bakalářské práce se věnuje laboratorní činnosti, a to konkrétně určením vlastnosti paliva a spalovacími experimenty na teplovodním kotli. Cílem pokusu bylo zjistit, jaký dopad bude mít výměna dřevních pelet za pelety ze sena na emisní hodnoty, výkon a celkovou funkčnost kotle. Naměřené hodnoty jsou srovnány s normou ČSN 303-5 a Ekodesign. Taktéž byl proveden hrubý rozbor obou použitých paliv a tuhého zbytku spalování sena.

6. 1 Popis experimentu na teplovodním kotli

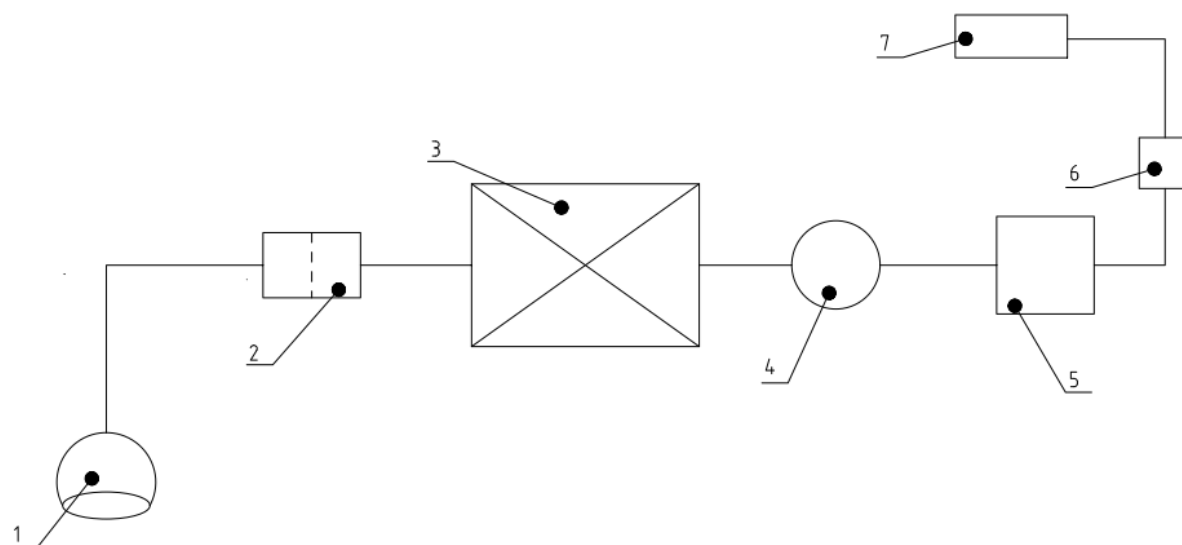


Obr. 6.1 Schéma okruhu

1... kotel; 2... čerpadlo; 3... trojcestný ventil; 4... výměník tepla; 5... chladicí věž; 6... chladicí nádrž

Na Obr. č. 6.1 lze vidět schéma okruhu, na kterém bylo prováděno měření celého experimentu. Dá se rozdělit na dvě části – červenou a modrou. V první, červené části probíhá ohřev vody na zvolenou teplotu, tedy 80 °C. Určitý díl této vody putuje k výměníku, kde se část tepla předá do okolí a další část se ochladí vodou z modrého okruhu (na teplotu 20 °C). Tyto ochlazené díly putují k trojcestnému ventilu, ve kterém se mísí i voda ohřátá (80 °C). Výsledkem je voda o teplotě 60 °C, která se vrací zpět do kotle a dále se ohřívá na již zmíněných 80 °C. Celý cyklus se poté opakuje.

V modrém okruhu se do výměníku čerpá voda z chladicí nádrže, kde dochází k výměně tepla. Pokud tato voda nedosahuje dostatečně nízkých teplot, jde přes ventil do chladicí věže, kde vychladne a vrátí se zpět.



Obr. 6.2 Schéma odběrové trati

1... odběrová hlavice; 2... filtr; 3... vodní chladič; 4... vývěva; 5... rotametr a plynometr; 6... PC; 7... teploměr

Na Obr. č. 6.2 lze vidět schéma odběrové trati. Při odběru TZL se používá předem vysušený a zvážený filtr, který se umístí do odběrového místa (Obr. 6.3) a pomocí vývěvy je odebírán vzorek. Odběr trvá půl hodiny a je u něj měřen průtok spalin. Po něm je filtr znovu vysušen a zvážen. Z rozdílu hmotností je známá hodnota koncentrace TZL.



Obr. 6.3 Odběrové místo



Obr. 6.4 Příruba k zachycení filtru



Obr. 6.5 Odběrové filtry před sušením k odběru TZL

Dále byly při pokusu měřeny emisní hodnoty plyných látek pomocí analyzátoru spalnin paliva.

Pomocí infračervené absorpční spektrometrie jsou měřeny hodnoty obsahu CO a NO_x. O₂ je analyzován pomocí magnetického analyzátoru a u obsahu organických sloučenin jde o analýzu pomocí plamenové ionizační metody – kvůli prázdné tlakové láhvi s vodíkem na kotelně toto měření neproběhlo.

Aby bylo možné provést porovnání kvality jednotlivých zařízení, je nutno získané hodnoty přepočítávat na tzv. referenční podmínky (přebytek spalovacího vzduchu, který je dán referenčním obsahem kyslíku ve spalínách) – to se počítá podle vztahu:

$$X_{ref} = X_{mg \cdot m^{-3}} \cdot \frac{21 - O_{2ref}}{21 - O_2} \quad (6.6)$$

X_{ref}... hmotnostní koncentrace přepočtená na referenční obsah O₂ [mg·m⁻³]

X_{mg·m⁻³}... zjištěná hmotnostní koncentrace [mg·m⁻³]

O_{2ref}... referenční obsah O₂ ve spalínách [%]

O₂... zjištěný obsah O₂ ve spalínách [%] [21]

V případě tohoto experimentu je brán referenční obsah O₂ 10%.



Obr. 6.6 Analyzátor spalín

Výkon kotle je vypočítán přímým výpočtem podle vzorce:

$$\dot{Q} = \dot{m}_v \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (6.7)$$

\dot{Q} ... výkon [kW]

\dot{m}_v ... průtok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

c_p ... kapalná kapacita vody [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

ΔT ... změna teploty mezi topnou vodou a vodou ve zpátečce za kotlem [K]

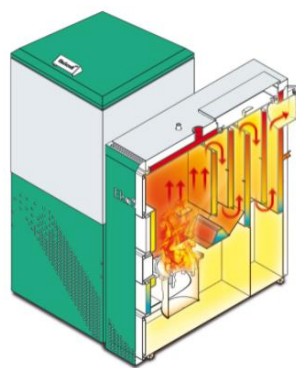
6. 2 Kotel

Spalování obou druhů pelet bylo provedeno na automatickém kotli na pelety Alfa Pellet o výkonu 25 kW od výrobce EkoScroll. Tento kotel má rotační hořák, velkokapacitní zásobník paliva, výměník z plechu o síle 6 mm, třídu energetické účinnosti A+, 5. emisní třídu dle

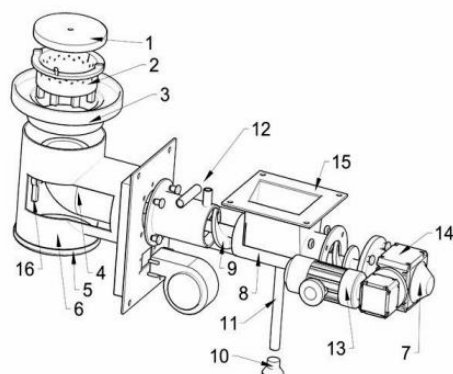
ČSN EN 303-5 a výrobce uvádí účinnost až 93,1 %. Garančním palivem jsou dřevní pelety třídy A1. [35]

	25kW
Rozsah tepelného výkonu	7,5-25
Provozní kominový tah	12-16
Objem vody ve výměníku	85
Rozsah regulace teploty	55-85
Minimální teplota vratné vody	55
Maximální příkon při jmenovitém výkonu	101
Pracovní tlak	2
Tlaková zkouška	4
Kapacita zásobníku paliva	330
Maximální teplota	85
Teplota salin	148/119
Hmotnostní průtok spalin	0,012/0,004
	3,8
Hydraulická ztráta kotle	1,9
Hodnota akustického tlaku	<51,4±3,2
Emisní třída kotle dle ČSN EN 303-5	5
Třída kotle dle ČSN en 303-5	4
	5
EKODESIGN	
EKODESIGN	
Třída energetické účinnosti	B
	A+
Druh paliva ALFA	
Druh paliva ALFA PELLET	
Hmotnost kotle	478
Napájecí napětí	230V/50Hz

Tab. 6.8 Technické parametry kotle [35]



Obr. 6.9 Kotel EkoScroll [35]



1. Deflektor
2. Vnitřní věnec
3. Vnější věnec
4. Koleno
5. Spodní víčko
6. Komora
7. Kryt střížného šroubu
8. Trubka podavače
9. Šnek
10. Podložka podpěry
11. Podpěra
12. Držák termoventilu
13. Motor
14. Převodovka
15. Příruba zásobníku paliva
16. Pohon retorty

Obr. 6.10 Schéma retortového hořáku [35]

6.3 Hrubý rozbor paliva

Následující podkapitola je věnována hrubému rozboru paliva, který byl prováděn na třech vzorcích: komerční dřevní peletě, nekomerční peletě ze sena a popela vzniklého při pálení sena (Obr. 6.11).



Obr. 6.11 Vzorky hrubého rozboru paliva

6. 3. 1 Stanovení obsahu vody tuhých paliv

Toto stanovení bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 18134-4 Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody. Princip této metody je určení úbytku hmotnosti po sušení vzorků za dané teploty ($105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Z tohoto úbytku je potom určen obsah vody, který se vyjadřuje v procentech. Hmotnosti jsou váženy s přesností na 0,1 mg.

Prvním krokem je zaznamenání hmotnosti prázdných, předem vysušených (při teplotě $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) a v exsikátoru vychladlých váženek, do kterých se posléze přidá přiměřené množství vzorku (minimálně 1 g). Takto naplněné váženky se opět zváží a jsou přeneseny do sušárny, kde jsou sušeny za již zmíněné teploty do konstantní hmotnosti (změna hmotnosti nepřesáhne 0,1 mg během jedné hodiny). Je nutné počítat s delší dobou sušení, avšak kvůli unikům těkavých složek do paliva nesmí být delší než 24 hodin. Po dosažení konstantní hmotnosti musí být váženka přesunuta do exsikátoru, kde dojde k jejímu ochlazení. Poté se zaznamená její hmotnost a obsah vody M^d (vyjádřený v procentech) je určen pomocí vzorce:

$$M^d = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad (6.12)$$

m_1 ... hmotnost prázdné váženky s víčkem [g]

m_2 ... hmotnost váženky včetně víčka se vzorkem před sušením [g]

m_3 ... hmotnost váženky včetně víčka se vzorkem po sušení [g]

Výsledná hodnota obsahu vody je z průměr z minimálně dvou stanovení s přesností na 0,1 % a musí být zaznamenán na dvě desetinná místa. [31]



Obr. 6.13 Vzorky připravené na sušení

6. 3. 2 Stanovení obsahu prchlavé hořlaviny tuhých biopaliv

Toto stanovení bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 18123 Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu prchlavé hořlaviny. Principem této metody je vystavení vzorku vysoké teplotě ($900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) po dobu $7\text{ minut} \pm 5\text{ sekund}$ a následným zvážením úbytku hmotnosti vzorku po v bezvodém stavu. Hmotnosti jsou váženy s přesností $0,1\text{ mg}$.

Prvním krokem je zaznamenání hmotnosti prázdného kelímku, který je vystaven teplotě $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu $7\text{ minut} \pm 5\text{ sekund}$, posléze vychlazen na tepelně odolné desce a následně uchován v exsikátoru. Do takto připraveného kelímku se naváže přiměřené množství vzorku a opakuje se stejný proces, jako s prázdným kelímkem. Po dosažení laboratorní teploty (nejprve na desce, poté v exsikátoru) je kelímek zvážen. Obsah prchlavé hořlaviny V^d (bezvodý stav) je vypočítán podle vzorce:

$$V^d = \left(\frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} - M^d \right) \cdot \left(\frac{100}{100 - M^d} \right) \quad (6.14)$$

m_1 ... hmotnost prázdného kelímku včetně víčka [g]

m_2 ... hmotnost kelímku se vzorkem včetně víčka před žiháním [g]

m_3 ... hmotnost kelímku se vzorkem včetně víčka po žihání [g]

M^d ... obsah vody ve vzorku v analytickém stavu [%]

Výsledná hodnota obsahu vody je z průměr z minimálně dvou stanovení s přesností na 0,1 % a musí být zaznamenán na dvě desetinná místa. [32]



Obr. 6.15 Muflová pec VEB elektro a tepelně odolná deska



Obr. 6.16 Chladnutí žíhaných kelímků se vzorky na laboratorní teplotu

6. 3. 3 Stanovení obsahu popela v tuhých palivech

Toto stanovení bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 18122 Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu popela. Principem této metody je vystavení vzorku vysoké teplotě ($550\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$), aby došlo k jeho spálení.

Prvním krokem je zaznamenání hmotnosti prázdného kelímku, který je vystaven teplotě $550\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ po dobu minimálně jedné hodiny, posléze vychlazen na tepelně odolné desce a následně uchován v exsikátoru. Do takto připraveného kelímku se naváže přiměřené množství vzorku a následně je přesunut do pece. Ta je chladná a je v ní spuštěn program, kdy se nejprve zvyšuje teplota na 250 °C po dobu 30 až 50 minut rychlostí 4,5 až 7,5 °C/minutu . Po dosažení již zmíněné teploty program setrvává jednu hodinu, aby došlo k uvolnění těkavých látek. Posléze dochází opět k postupnému zvýšení teploty, a to na $550\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ po dobu dalších 30 minut rychlostí 10 °C/minutu . Na této teplotě program setrvává nejméně dvě hodiny. Po uplynutí této doby se kelímek vyndá na tepelně odolnou desku, poté je zchlazen na laboratorní teplotu v exsikátoru a zvážen. Obsah popela W^a (bezvodý stav) je dán v procentech a je určen pomocí rovnice:

$$W^a = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M^d} \quad (6.17)$$

m_1 ... hmotnost prázdného kelímku[g]

m_2 ... hmotnost žíhaného kelímku se vzorkem [g]

m_3 ... hmotnost kelímku se vzorkem po spálení [g]

M^d ... obsah vody ve vzorku v analytickém stavu [%]

Výsledná hodnota obsahu popela je z průměr z minimálně dvou stanovení s přesností na 0,1 % a musí být zaznamenán na dvě desetinná místa. [33]



Obr. 6.18 Laboratorní pec komorová



Obr. 6.19 Navážka

6. 3. 4 Stanovení spalného tepla

Toto stanovení bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 18125 Tuhá biopaliva - Stanovení spalného tepla a výhřevnosti. Principem této metody je spálení vzorku v tlakové nádobě, která je pod vysokým tlakem naplněna kyslíkem.

Prvním krokem je nachystání tlakové nádoby – do ní je nutné nalít 10 ml \pm 0,1 ml vody, navázat na zapalovací drátek bavlněnou nit a tu vložit společně se vzorkem do kelímku.

Takto připravená nádoba se utáhne a je připravena na naplnění kyslíkem na přetlak 2,5 – 3 MPa. Poté se nádoba vloží do kalorimetru, který je nutné naplnit přibližně dvěma litry vody o laboratorní teplotě (20 °C – 22 °C). Před spuštěním kalorimetru se zadá přesná hmotnost navážky a vybere se daný program. Po zhruba 8 minutách kalorimetr sám vyhodnotí hodnotu spalného tepla. [34]



Obr. 6.20 Kalorimetr IKA C 20



Obr. 6.21 Plnění nádoby



Obr. 6.22 Rozložená tlaková nádoba

7 Výsledky experimentální části a její zhodnocení

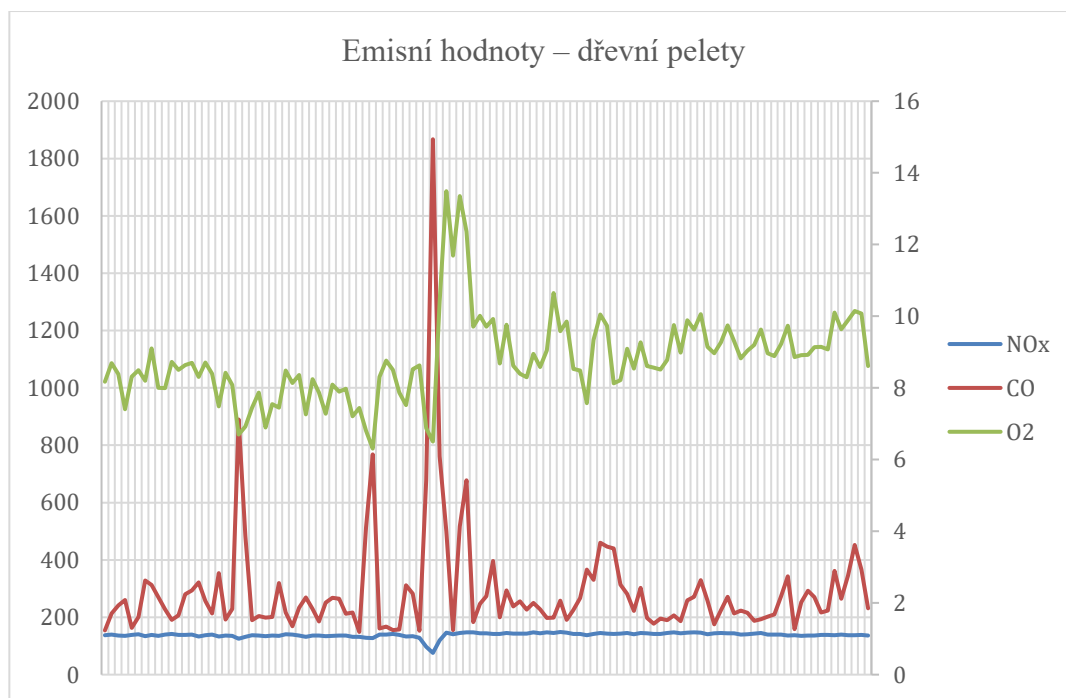
Následující kapitola se věnuje výsledkům měření experimentu na teplovodním kotli a shrnutím výsledků hrubého rozboru zkoumaných paliv.

7.1 Výsledky experimentu prováděném na teplovodním kotli

Cílem celého experimentu bylo porovnání chování automatického teplovodního kotle, určeného na dřevní pelety, pokud jsou v něm páleny agropelety – v tomto případě je to již zmiňované seno. V průběhu celého experimentu měl kotel nastaven parametry ideální pro pálení dřevní pelety. Jediné parametry, které byly změněny, byly ty, které si nastaví sám průměrný uživatel kotle na řídicí jednotce: výhřevnost paliva, ovládání podavače a požadovaný výkon. Při pálení sena bylo na rozšiřujícím modulu preventivně zapnuto čištění (doba otáčení rotačního tělesa hořáku).

7.1.1 Spalování dřevních pelet

Při spalování dřevních pelet byly provedeny tři měření TZL, u kterých byly mimo jiné sledovány i emisní hodnoty a výkon.



Graf 7.1 Emisní hodnoty – dřevní pelety

O ₂	NO _x	CO	TZL
8,78	138,60	292,37	35,40

Tab. 7. 2 Průměrná hodnota emisí

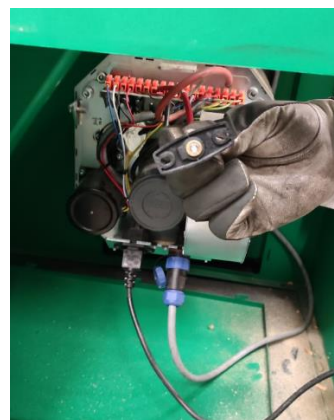
Hodnoty NO_x, CO a TZL jsou přepočteny na referenční obsah O₂ (10 %) dle vzorce 6.6 a jsou uvedeny v mg·m⁻³. 5. emisní třída, která je garantovaná výrobcem, je splněna. Taktéž je splněna norma Ekodesign.

3 skoky, které lze v Grafu 7.1 pozorovat, byly způsobeny spékáním pelet ve spalovacím prostoru. Zde se nachází čidlo pro detekci hoření, které bylo v čase největšího skoku překryto (čidlo přestalo vnímat plamen) a kotel přešel do zápalu – došlo ke zvýšení hodnoty kyslíku a tím pádem i oxidu uhelnatého. I přes tuto nedokonalost průměrná hodnota všech emisí splnila obě normy.

Filtry, na které se odebíraly TZL, jdou vidět na Obr. 7.5. Mezi filtry S1 a S3 (vrchní dva) jsou vizuálně velmi podobné a množství TZL bylo podobné. U filtru S2 (dolní) lze spatřit znatelný rozdíl – při odběru byla lehce překročena izokinetika a tím pádem se odsávalo více TZL, než u předchozích dvou vzorků.



Obr. 7. 3 Spečené pelety v hořáku po vychladnutí kotle



Obr. 7. 4 Čidlo

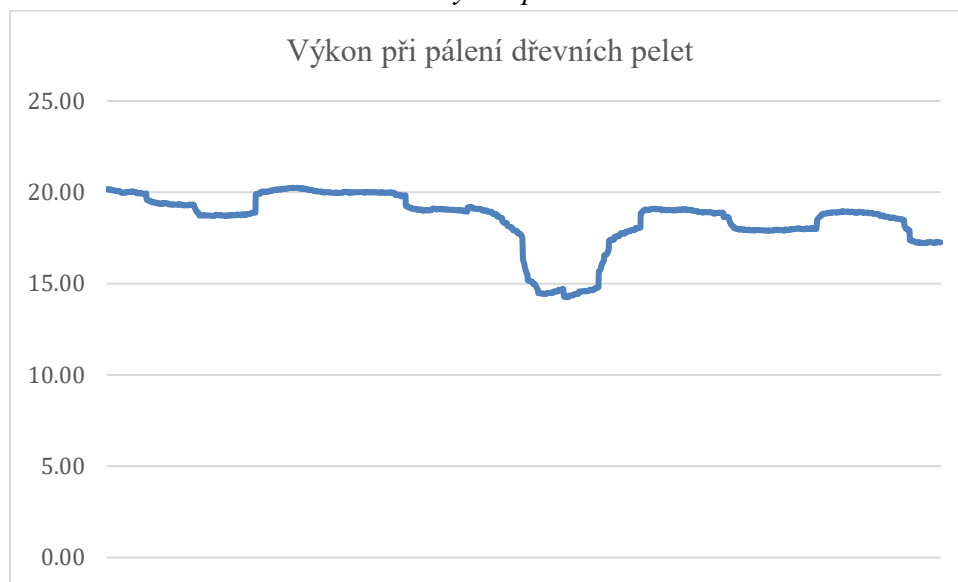


Obr. 7. 5 Filtry po odběru TZL

Průměrná hodnota výkonu třech měření vyšla 18,43 kW. Hodnota je nižší díky již zmiňovaným skokům – nedocházelo k dobrému spalování pelet a tudíž i kotel nedosahoval očekávaného výkonu.

S1	S2	S3	Průměr
19,58	17,60	18,10	18,43

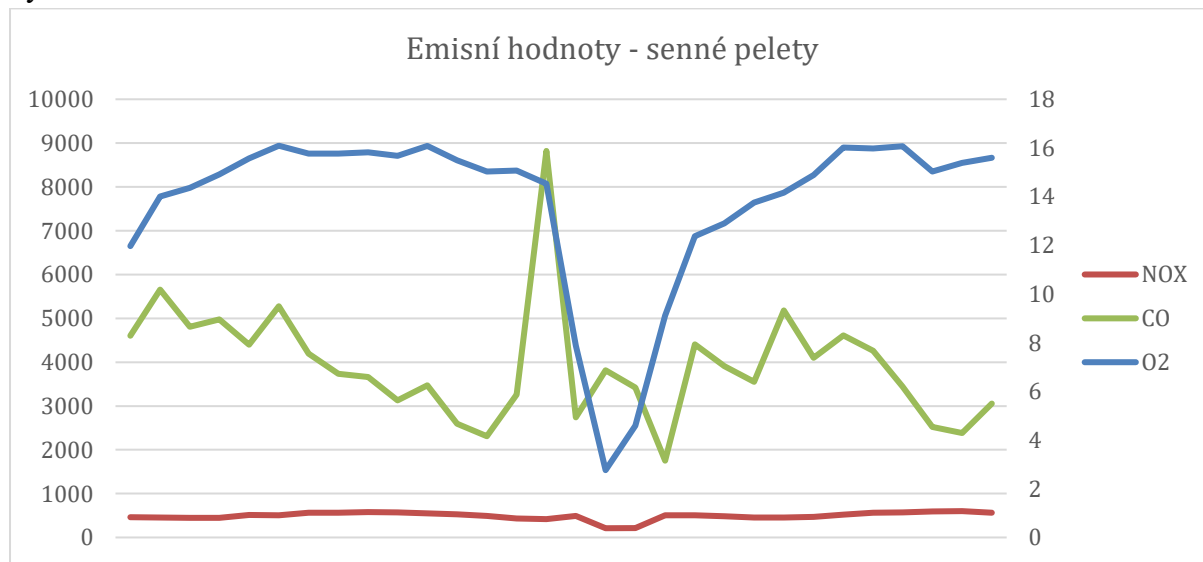
Tab. 7.6 Výkon při měření



Graf 7. 7 Výkon při pálení dřevních pelet

7. 1. 2 Spalování pelet ze sena

Při spalování pelet ze sena bylo provedeno pouze jedno měření TZL, dále se měřily emise a výkon.



Graf 7.8 Emisní hodnoty – senné pelety

O ₂	NO _x	CO	TZL
13,55	487,12	3860,54	141,60

Tab. 7.9 Průměrná hodnota emisí

Hodnoty NO_x, CO a TZL jsou přepočteny na referenční obsah O₂ (10 %) dle vzorce 6.6. Z grafu a tabulky průměrných hodnot emisí lze vidět, že docházelo k nedokonalému spalování. Hodnota kyslíku je o 5% vyšší než u spalování dřeva. Množství oxidů dusíků překračuje více než dvakrát krajní hodnotu dle normy Ekodesign. Oxid uhelnatý překračuje téměř osmkrát hodnotu, který by podle normy ČSN EN 303-5 měla mít výrobcem garantovaná 5. emisní třída kotle.

Průměrný výkon při měření byl 10,48 kW. Takto nízká hodnota se dala vzhledem k nedokonalosti spalování očekávat.

Při spalování bylo největším problémem spékání sena ve spalovacím prostoru a velké množství nespálených pelet. Na Obr. 7.10 je zaznamenán hodinový rozdíl v popelníkovém prostoru. Stejně, jako u spalování dřevních pelet, čidlo bylo zastíněno a kotel neustále přecházel do zápalu a tím nemohl dosáhnout větších hodnot výkonu.

Alarmující hodnota oxidu uhelnatého se dá přisoudit špatným reakčním podmínkám v kotli – nízké teplotě a díky nahromadění nedopálených pelet špatnému přístupu kyslíku. Překročená hodnota oxidů dusíků může být ze dvou důvodů. Prvním z nich je příliš vysoká teplota, při kterých se tvoří oxidy přímo z molekul N₂ obsažených ve vzduchu – to je v tomto případě nepravděpodobné. Druhým důvodem je vysoký obsah dusíku přímo v palivu. Dusík je biogenní prvek, který je v určitém množství zásadní pro růst rostlin – proto je dodáván do půdy jako hnojivo a je možné, že se mohl vyskytovat i v seně, ze kterého byly pelety vyrobeny.



Obr. 7.10 Tuhé zbytky po spalování senných pelet



Obr. 7.11 Filtr po odběru TZL

7. 2 Výsledky hrubého rozboru paliv

Všechny tři vzorky byly podrobeny již dříve zmíněným postupům pro stanovení obsahu vody, popela, prchlavé hořlaviny a spalného tepla. V Tab. 7.4 lze vidět souhrn všech stanovených hodnot. Další podkapitoly se věnují každému zvlášť.

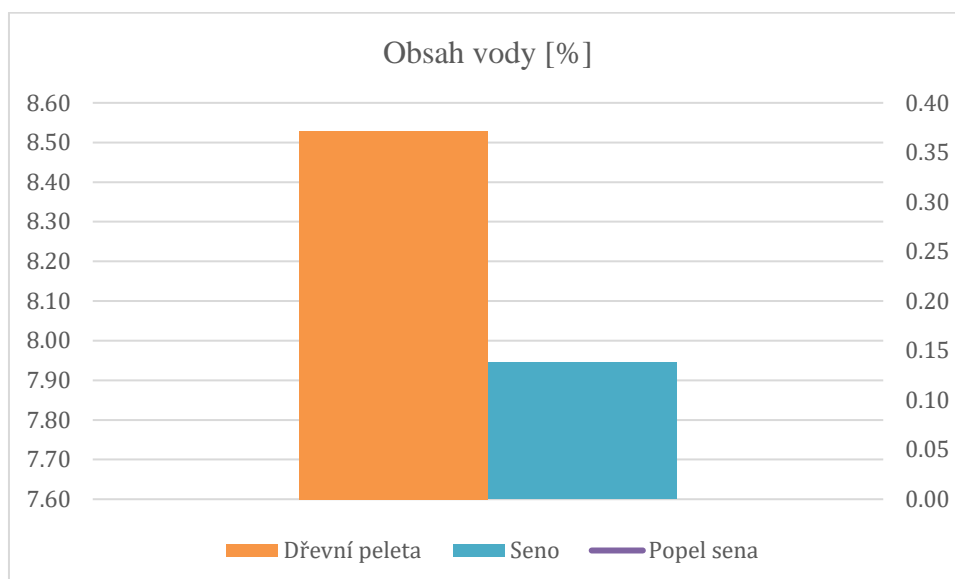
		Dřevní peleta	Seno	Popel sena
Obsah vody	M ^d [%]	8,53	7,94	0,35
Obsah popele	W ^a [%]	0,35	6,86	85,31
Obsah prchlavé hořlaviny	V ^d [%]	84,79	74,71	10,03
Spalné teplo	HHV ^a [MJ/kg]	18,33	17,03	11,14

Tab. 7.12 Výsledky hrubého rozboru zkoumaných paliv

7. 2. 1 Srovnání obsahu vody

Stanovení obsahu vody bylo prováděno na třech vzorcích od každého vzorku paliva, nebylo žádnou překážkou provádět zkoušku zároveň pro všechny vzorky. Jedinou nevýhodou by se mohla zdát časová náročnost.

Obsah vody u dřevních a senných pelet byl naměřen relativně podobný. Není překvapení, že obsah vody u popela sena dosáhl minimálních hodnot – šlo o již spálený vzorek.



Graf 7.13 Srovnání paliv podle obsahu vody

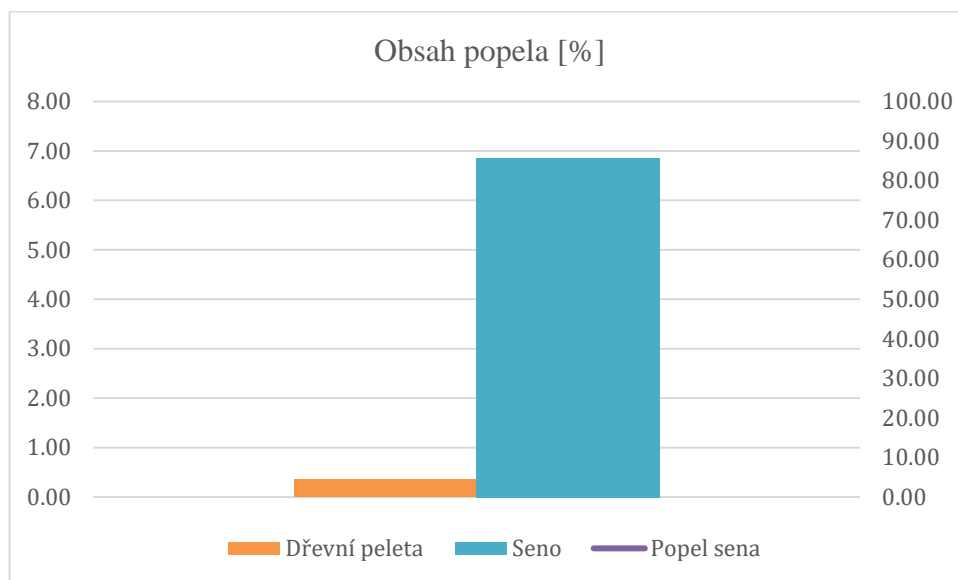


Obr. 7.14 Vzorky paliva podrobené zkouškou na obsah vody

7. 2. 2 Srovnání obsahu popela

Stanovení obsahu popela bylo prováděno na třech vzorcích od každého vzorku paliva, nebylo žádnou překážkou provádět zkoušku zároveň pro všechny vzorky. Jedinou nevýhodou by se mohla zdát časová náročnost.

Nejnižší hodnoty dosáhly dřevní pelety, u kterých se i při experimentu na kotli dokázala, že mají minimum odpadu. Na Obr. 7.16 lze vidět jasný rozdíl mezi sennými a dřevnými peletami. U popela sena není opět překvapivá vysoká hodnota, šlo již o spalinu.



Graf 7.15 Srovnání paliv podle obsahu popela

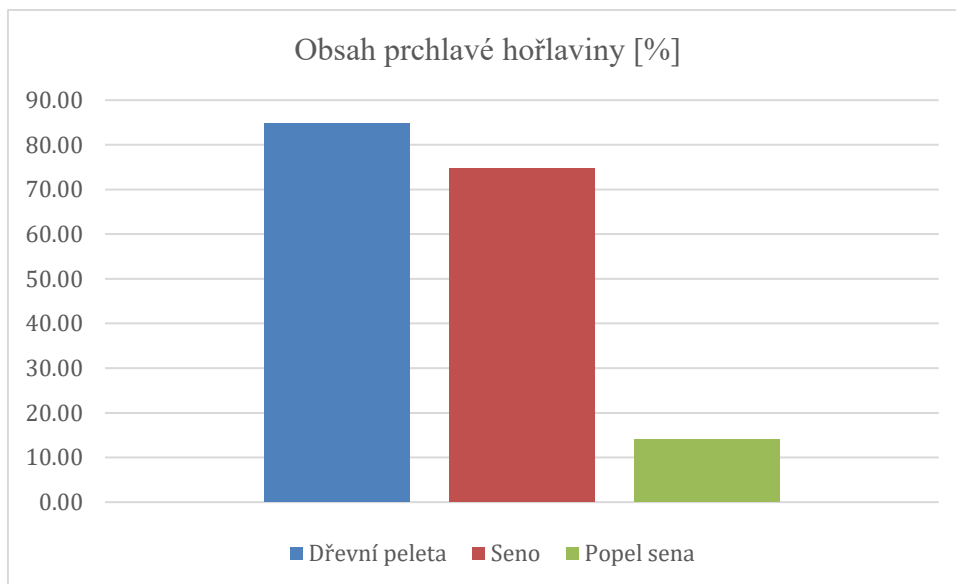


Obr. 7.16 Vzorky paliva podrobné zkouškou na obsah popela

7. 2. 3 Srovnání obsah prchlavé hořlaviny

U stanovení obsahu prchlavé hořlaviny bylo možné provádět zkoušku vždy jen po jednom vzorku – po více kusech by zkouška nebyla přesná a neodpovídala normě.

Největší hodnoty opět dosáhly dřevní pelety, nejmenší popel sena.



Graf 7.17 Srovnání paliv podle obsahu prchlavé hořlaviny



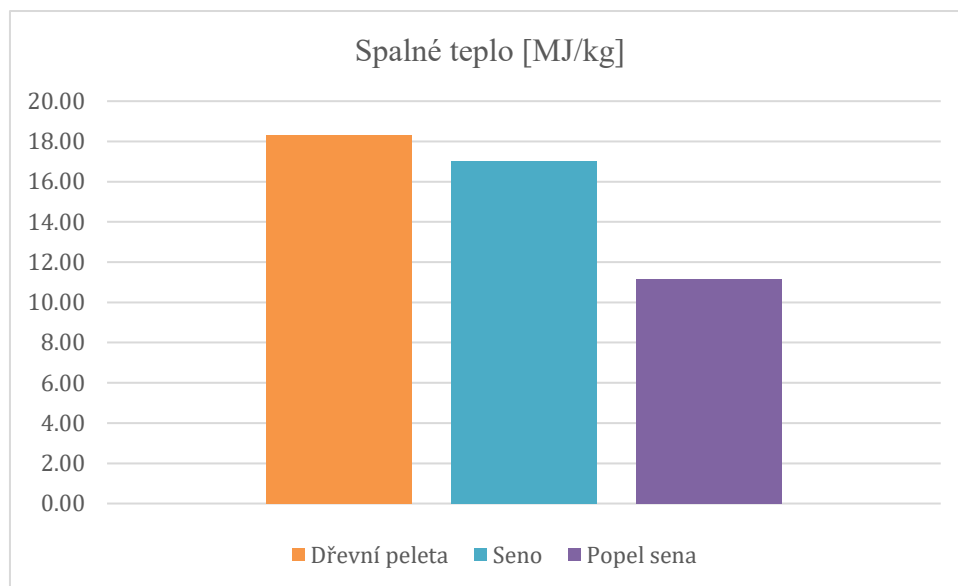
Obr. 7.18 Ukázka vzorků po provedení zkoušky na obsah prchlavé hořlaviny

7. 2. 4 Srovnání hodnot spalného tepla

Tato zkouška byla možná provádět vždy jen po jednom vzorku.

Dřevní a senné pelety byly podrobeny této zkoušce po dvou vzorcích, jejich výsledek se ani v jednom z případů nelišil o více než 0,1 MJ/kg, tudíž se dá tato metoda považovat jako přesná a vhodná pro oba typy pelet. Na druhou stranu u popela sena proběhla zkouška na

čtyřech vzorcích a hodnoty se lišily i o 10 MJ/kg – tato odchylka se dá přisoudit velké nehomogenitě vzorku. Proto tato zkouška pro určení spalného tepla tuhého zbytku spalování sena není vhodná.



Graf 7.19 Srovnání paliv podle spalného tepla



Obr. 7.20 Zbytky v kelímku po zkoušce na spalné teplo (vlevo senné pelety, vpravo popel sena)

7.3 Zhodnocení experimentu

Cílem experimentu porovnání spalování dřevěných a senných pelet na automatickém teplovodním kotli při stejném nastavení.

Při spalování dřevěných pelet byly splněny emise podle obou porovnávaných norem: ČSN EN 303-5 a Ekodesign (viz. Tab. 7.21). Výkon při odběru TZL byl nižší než nominální výkon. To se dá přisoudit tomu, že kotle za normálního používání tohoto výkonu nedosahují.

Taktéž se díky překrytí čidla snímající hoření spečenými peletami dostal kotel do zápalu a způsobil nahromadění oxidu uhelnatého a pokles obsahu kyslíku.

Při spalování senných pelet byly emisní hodnoty několikrát překročeny a kotel dosáhl polovičního výkonu, než měl u spalování dřevěných pelet. Nedokonalým spalováním docházelo k tvorbě velkých kusů spečenců, opět docházelo k překrytí čidla a kotel se zacyklil mezi vyhasnutí a spínání. Tuhého zbytku spalování bylo výrazně více u senných, než dřevěných pelet.

Taktéž byl proveden hrubý rozbor paliva. Zde se ukázalo, že dřevo je díky nízkému obsahu popela nejideálnějším palivem. Další zkoumané vlastnosti, jako byl třeba obsah vody nebo spalné teplo, byly se senem srovnatelné.

Závěr experimentu je to, že pelety ze sena nejsou vhodným palivem pro automatické teplovodní kotle o menších nominálních výkonech pro domácí využití. Spalováním senných pelet dochází k nahromadění nebezpečného oxidu uhelnatého, který může díky žhavení, které se zapne kvůli překrytí čidla, vybuchnout. To může vést k odstavení a nebo dokonce i poškození kotle.

	NO _x [mg.m ⁻³]	CO [mg.m ⁻³]	TZL [mg.m ⁻³]
Max. hodnota	200	500	40
Dřevní pelety	138,60	292,37	35,40
Senné pelety	487,12	3860,54	141,60

Tab. 7.21 Srovnání emisních hodnot

8 Závěr

První půlka této bakalářské práce se zaměřuje na rešerši biomasy, paliva používaná ke spalování, kotlů na tuhá paliva a legislativu, která byla souvisela s experimentem.

Druhá kapitola představuje pojem biomasa jako takový, přibližuje její druhy, využití na území České republiky a rozebírá některé typy jejího zpracování.

Třetí kapitola se věnuje palivům z biomasy, která jsou určena k přímému spalování. Taktéž pojednává o základních vlastnostech paliv, které jsou přiblíženy v experimentální části při hrubém rozboru paliv.

Ve čtvrté kapitole je rozebrána problematika kotlů na tuhá paliva – jsou popsány základní konstrukční části, rozdělení do základních kategorií a představení některých typů hořáků.

V poslední rešeršní kapitole je rozebrána legislativa týkající se nadcházejícího experimentu. Jsou také přiblíženy základní emisní faktory, které při spalování vznikají.

Druhá půlka práce se zabývá experimentem, jehož cílem bylo porovnání spalování dřevěných a senných pelet na automatickém teplovodním kotli. Taktéž byl proveden hrubý rozbor paliva.

V šesté kapitole je popsán postup experimentu, jsou uvedeny využité vzorce a rozebrán hrubý rozbor paliva.

Sedmá kapitola je věnována výsledkům a diskuzi. Při experimentu se ukázalo, že pro teplovodní automatické kotle pro domácí využití nejsou pelety ze sena vhodné – byly překročeny všechny emisní limity, výkon kotle byl oproti dřevním peletám poloviční a u neznalého uživatele by mohlo dojít až k poškození kotle.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. ISBN 978- 80-247-3250-3.
- [2] Fotosyntéza. *ELUC* [online]. [cit. 2021-2-4]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/51>
- [3] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta, aneb, Peleta mýtů zbavená*. Krnov: LING Vydavatelství, 2011. ISBN 978-80-904914-0-3.
- [4] *Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR* [online]. 6. února 2017 [cit. 2021-2-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>
- [5] BUFKA, Ing. Aleš, Ing. Jana VEVERKOVÁ, PH.D., Ing. Miroslav MODLÍK a Mgr. Jana BLECHOVÁ-TOURKOVÁ. *Obnovitelné zdroje energie v roce 2019* [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2020/9/Obnovitelne-zdroje-energie-2019_2.pdf
- [6] *Biomass processing technologies* [online]. [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/biomass-processing-technologies/>
- [7] ZAFAR, Salman. *Types of Biomass* [online]. 2021 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://www.bioenergyconsult.com/tag/types-of-biomass/>
- [8] LYČKA, Zdeněk. *Malé teplovodní kotle na pevná paliva: spalování pevných paliv po roce 2013*. Krnov: LING Vydavatelství, 2012. ISBN 978-80-904914-2-7.
- [9] *TYPY KOTLŮ NA PEVNÁ PALIVA* [online]. [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.topmeuhlim.cz/typy-kotlu-na-pevna-paliva/>
- [10] VALČÍK, Jan. *Porovnání hořáků pro automatické kotle* [online]. 8.10.2014 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11812-porovnani-horaku-pro-automaticke-kotle>
- [11] MUŽÍK, Oldřich a Antonín SOJKA. *Možnosti využití anaerobní fermentace pro zpracování zbytkové biomasy* [online]. 14.7.2003 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-vyuziti-anaerobni-fermentace-pro-zpracovani-zbytkove-biomasy>
- [12] *Biomasa: Co je dobré vědět, než ji začneme spalovat* [online]. 29. 6. 2010 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/vytapani-1/biomasa/biomasa-co-je-dobre-vedet-nez-ji-zacneme-spalovat.aspx>

[13] VRTIŠKA, Ondřej. *Živé továrny vyrábějí ropu* [online]. 7. 7. 2013 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/96301>

[14] MOLEK, Tomáš. [online]. 21. 2. 2017 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/pyrolyza-princip-historie-a-soucasnost>

[15] POHOŘELÝ, Michael a Michal JEREMIÁŠ. *Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění* [online]. 24. 11. 2010 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>

[16] STUPAVSKÝ, Vladimír. *O vytápění biomasou od A až do Z* [online]. 14. 10. 2020 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/peletky/8814-o-vytapeni-biomasou-od-a-az-do-z>

[17] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka1.pdf* [online]. [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka1.pdf>

[18] *Výhřevnost* [online]. [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/slovník.aspx?pid=117>

[19] KOLONIČNÝ, Jan: Emise při spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2010-06-07 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy-2>>. ISSN: 1801-2655.

[20] KOUTSKÝ, Martin, MACHNÍKOVÁ, Eva, HENKEL, Martin, DITTRICH, Martin, VOŠTA, Jan: Emise při spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2002-08-07 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy>>. ISSN: 1801-2655.

[21] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta II: spalování v malých zdrojích tepla*. Krnov: LING Vydavatelství, 2011. ISBN 978-80-904914-1-0.

[22] *Characteristics of Biomass as a Heating Fuel* [online]. 2.3.2010 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://extension.psu.edu/characteristics-of-biomass-as-a-heating-fuel>

[23] STUPAVSKÝ, Vladimír. *Pelety z biomasy - dřevěné, rostlinné, kůrové pelety* [online]. 1.1.2010 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/pelety-z-biomasy-drevene-rostlinne-kurove-pelety>

[24] STUPAVSKÝ, Vladimír a Tomáš HOLÝ. *Dřevní štěpka - zelená, hnědá, bílá* [online]. 1.1.2010 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila>

[25] HORÁK, Jiří a Lubomír MARTINÍK. *Jaké parametry musí splnit kotle na tuhá paliva? Legislativa v ČR a Evropě – stav v roce 2017* [online]. 5.6.2017 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/15865-jake-parametry-musi-splnit-kotle-na-tuha-paliva>

[26] *Národní program snižování emisí* [online]. [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/narodni_program_snizovani_emisi

[27] ČSN 303-05. Kotle pro ústřední vytápění. Praha: Český normalizační institut, 2000.

[28] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2015/1189 ze dne 28. dubna 2015, kterým se provádí směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES, pokud jde o požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva. In: . Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2015_193_R_0005

[29] STUPAVSKÝ, Vladimír. *Kotlíková dotace přehledně* [online]. 9.9.2013 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/10312-kotlikova-dotace-prehledne>

[30] LYČKA, Zdeněk. *Pokračování kotlíkových dotací v rámci programu OPŽP 2021 – 2027* [online]. 6.1.2021 [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/21692-pokracovani-kotlikovych-dotaci-v-ramci-programu-opzp-2021-2027>

[31] ČSN EN ISO 18134-3 (838220). Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu vody – Metoda sušení v sušárně – Část 3: Obsah vody v analytickém vzorku pro obecný rozbor. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. ISBN 8590963993416.

[32] ČSN EN ISO 18123 (838222). Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu prchavé hořlaviny. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. ISBN 8596135001293.

[33] ČSN EN ISO 18122 (838210). Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu popela. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. ISBN 8596135001248.

[34] ČSN EN ISO 18125 (838214). Tuhá biopaliva - Stanovení spalného tepla a výhřevnosti. 1. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019. ISBN 8596135069316.

[35] *AUTOMATICKÝ KOTEL NA PELETY ALFA PELLET* [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.ekoscroll.cz/automaticky-kotel-na-pelety-alfa-pellet>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SEZNAM ZKRATEK

HHV the higher heating value
LHV the lower heating value

SEZNAM SYMBOLŮ

ČR Česká republika
DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
EU Evropská unie
MŽP Ministerstvo životního prostředí
OGC celkový organický uhlík
OPŽP Operační program Životního prostředí
SFŽP Státní fond životního prostředí České republiky
TZL Tuhé znečišťující látky

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 2.1 Využití biomasy [4]
Obr. 2.4 Princip zplyňování [15]
Obr. 3.1 Náklady na vytápění [16]
Obr. 3.2 Dřevní pelety [16]
Obr. 3.3 Srovnání odpadu u papírových pelet [3]
Obr. 3.4 Dřevěné brikety [16]
Obr. 3.5 Dřevní štěrka vyrobená nožovým štěpkovačem [24]
Obr. 3.6 Dřevní štěrka vyrobená kladivovým drtičem [24]
Obr. 3.7 Spalné teplo různých paliv [22]
Obr. 3.8 Závislost spalného tepla a výhřevnosti na obsahu vlhkosti paliva [22]
Obr. 4.1 Obecný teplovodní kotel [8]
Obr. 4.2 Rozdělení kotlů podle technologie spalování [8]
Obr. 4.3 Hořák samočisticí [10]
Obr. 4.4 Retortový hořák [10]
Obr. 4.5 Univerzální hořák [10]
Obr. 4.6 Typy podavačů [10]
Obr. 5.5 Podporované typy kotlů v Kotlíkové dotaci [29]
Obr. 6.1 Schéma okruhu
Obr. 6.2 Schéma odběrové trati
Obr. 6.3 Odběrové místo
Obr. 6.4 Příruba k zachycení filtru
Obr. 6.5 Odběrové filtry před sušením k odběru TZL
Obr. 6.6 Analyzátor spalin
Obr. 6.9 Kotel EkoScroll [35]
Obr. 6.10 Schéma retortového hořáku [35]
Obr. 6.11 Vzorky hrubého rozboru paliva
Obr. 6.13 Vzorky připravené na sušení
Obr. 6.15 Muflová pec VEB elektro a tepelně odolná deska
Obr. 6.18 Laboratorní pec komorová
Obr. 6.19 Navážka
Obr. 6.20 Kalorimetr IKA C 20
Obr. 6.21 Plnění nádoby
Obr. 6.22 Rozložená tlaková nádoba
Obr. 7.3 Spečené pelety v hořáku po vychladnutí kotle
Obr. 7.4 Čidlo
Obr. 7.3 Filtry po odběru TZL
Obr. 7.10 Tuhé zbytky po spalování senných pelet
Obr. 7.11 Filtr po odběru TZL
Obr. 7.14 Vzorky paliva podrobené zkouškou na obsah vody
Obr. 7.16 Vzorky paliva podrobené zkouškou na obsah popela

Obr. 7.18 Ukázka vzorků po provedení zkoušky na obsah prchlavé hořlaviny

Obr. 7.20 Zbytky v kelímku po zkoušce na spalné teplo (vlevo senné pelety, vpravo popel sena)

SEZNAM TABULEK

- Tab. 2.2 Výroba elektřiny z biomasy podle jejich typů v roce 2019 [5]
Tab.2.3 Výroba tepelné energie z biomasy podle jejich typů v roce 2019 *) [5]
Tab. 3.9 Velikost a objemová hmotnost typicky používaných paliv [22]
Tab.5.1 Emisní limity CO dle EN 303-5:2012 [27]
Tab.5.2 Emisní limity OGC dle EN 303-5:2012 [27]
Tab.5.3 Emisní limity prachu dle EN 303-5:2012 [27]
Tab. 6.8 Technické parametry kotle [35]
Tab. 7. 2 Průměrná hodnota emisí
Tab. 7.6 Výkon při měření
Tab. 7.9 Průměrná hodnota emisí
Tab. 7.12 Výsledky hrubého rozboru zkoumaných paliv
Tab. 7.21 Srovnání emisních hodnot

SEZNAM GRAFŮ

Graf 5.4 Minimální požadované účinnosti kotlů do 100 kW, porovnání požadavků EN 303-5:2012 [25]

Graf 5.6 Emisní faktory CO přepočtených na výhřevnost tepla [19]

Graf 5. 7 Emisní faktory NO_x přepočtených na výhřevnost paliva [19]

Graf 5. 8 Emisní faktory CO₂ [19]

Graf 7.1 Emisní hodnoty – dřevní pelety

Graf 7. 7 Výkon při pálení dřevních pelet

Graf 7.8 Emisní hodnoty – senné pelety

Graf 7.13 Srovnání paliv podle obsahu vody

Graf 7.15 Srovnání paliv podle obsahu popela

Graf 7.17 Srovnání paliv podle obsahu prchavé hořlaviny

Graf 7.19 Srovnání paliv podle spalného tepla